

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
海洋技術環境学専攻

2019 年度

修士論文

**海水飛沫観測データ解析による  
船舶の大規模な海水飛沫発生条件に関する研究  
(A study on condition of large amount of sea spray generation  
on a vessel by full-scale sea spray data analysis)**

2019 年 7 月 19 日提出

指導教員  
山口 一 教授

47-176647 伏見修一



# 目次

1	序論	8
1.1	北極への注目の高まり	8
1.2	ArCS：北極域研究推進プロジェクト	9
1.3	北極海航路 (NSR)	12
2	船体着氷	14
2.1	一般的知見	14
2.1.1	発生メカニズム	14
2.1.2	予防策	15
2.1.3	着氷発生時の対応	15
2.2	着氷に関する先行研究	15
2.2.1	着氷指標 PR	15
2.2.2	海水飛沫と船体着氷の関係	18
2.3	海水飛沫に関する研究	19
2.4	本研究の目的	20
3	利用した観測機器/設備/船舶/データセット	21
3.1	飛沫観測装置	21
3.1.1	Spray Particle Counter(SPC)	21
3.1.2	Marine Rain gauge type Spray gauge(MRS)	23
3.2	海洋地球研究船「みらい」	25
3.2.1	MIRAI Surface Meteorological observation system(SMet)	28
3.2.2	Shipboard Oceanographic and Atmospheric Radiation measurement system(SOAR)	30
3.2.3	Ship board Three Component Magnetometer(STCM)	31
3.2.4	動揺特性 (RAO)	32
3.3	ERA5	34

3.3.1	10 metre U wind component(10u) . . . . .	34
3.3.2	10 metre V wind component(10v) . . . . .	35
3.3.3	Total precipitation(tp) . . . . .	35
3.3.4	Significant height of combined wind waves and swell(swh) . . . . .	35
3.3.5	Mean wave period(mwp) . . . . .	35
3.3.6	Mean wave direction(mwd) . . . . .	35
3.4	計算によって取得できるデータ . . . . .	36
3.4.1	海洋波の波長・位相速度 . . . . .	36
3.4.2	波形勾配 . . . . .	37
3.4.3	出会い周期・出会い角速度 . . . . .	37
3.4.4	動搖振幅・周期 . . . . .	37
4	飛沫観測機材の精度検証実験 . . . . .	38
4.1	実験背景 . . . . .	38
4.1.1	過去の実験概要 . . . . .	38
4.1.2	本実験の目的 . . . . .	39
4.2	実験環境 . . . . .	40
4.2.1	防災科学研究所低音風洞 . . . . .	40
4.2.2	飛沫発生装置 . . . . .	40
4.3	実験条件 . . . . .	42
4.4	実験結果 . . . . .	43
4.5	考察 . . . . .	44
4.6	結論 . . . . .	44
5	「みらい」における観測 . . . . .	45
5.1	飛沫観測データ . . . . .	47
5.1.1	右舷 MRS で取得されたデータ . . . . .	47
5.1.2	左舷 MRS で取得されたデータ . . . . .	47
5.1.3	SPC で取得されたデータ . . . . .	48
5.2	「みらい」で観測された飛沫と各種データとの関連 . . . . .	49

5.3	考察	54
5.4	まとめ	56
6	ERA5 からの海水飛沫予測	57
6.1	波浪と飛沫量の 2 次元ヒストグラム	57
6.2	気象予報データと飛沫量の関係	61
6.3	まとめ	62
7	飛沫観測試験航行	63
7.1	実施条件	63
7.1.1	実施計画	63
7.1.2	実施時の状況	64
7.2	結果	66
7.2.1	第一回飛沫試験航行	66
7.2.2	第二回飛沫試験航行	69
7.2.3	第三回飛沫試験航行	71
7.3	考察と今後の課題	73
8	結論	74
8.1	まとめ	74
8.2	今後の課題	75

## 図目次

1	衛星による観測値(赤)と数値モデルによる(破線)海氷域面積の比較 [13] . . . . .	8
2	ArCS 実施体制および課題一覧 [2] . . . . .	10
3	ADS におけるデータ流通の概念と国際連携 [25] . . . . .	11
4	観測データのフロー図 [25] . . . . .	11
5	従来航路と北極海航路 [5] . . . . .	12
6	船体着氷発生のメカニズムの模式図 [3] . . . . .	14
7	2018/3/31 の南極周辺の着氷指標 . . . . .	17
8	2017/10/31 の北極周辺の着氷指標 . . . . .	17
9	JARE55 における海水飛沫量と相対風速の相関図 [12] . . . . .	19
10	SPC 本体 . . . . .	21
11	SPC センサー部 [37] . . . . .	21
12	SPC センサーと記録装置の模式図 [37] . . . . .	22
13	MRS 本体 . . . . .	23
14	MRS の飛沫捕縛部 (a) と取り付け概略図 (b) . . . . .	23
15	おんどとり Jr 電圧用 RTR-505V (左上) / 大容量バッテリーパック (左下) / RTR-500 親機 (右) . . . . .	25
16	「みらい」に搭載された主な観測システム [32] . . . . .	26
17	「みらい」搭載の海上気象観測装置 . . . . .	28
18	船長波長比 0.5-2.4 における「みらい」ピッチ揺れの RAO . . . . .	33
19	試験 1 における飛沫量の比較 [15] . . . . .	39
20	試験 2 における飛沫量の比較 [15] . . . . .	39
21	低温室内の実験装置 [36] . . . . .	40
22	飛沫発生装置 . . . . .	41
23	飛沫発生ノズルの配置 . . . . .	41
24	飛沫発生装置 . . . . .	42
25	KB063 における飛沫量の比較 . . . . .	43
26	KD042 における飛沫量の比較 . . . . .	43

27	KD084 における飛沫量の比較 . . . . .	43
28	KD224 における飛沫量の比較 . . . . .	43
29	MR18-05C の航跡および CTD 投入点 [8] . . . . .	45
30	「みらい」における飛沫計設置箇所 . . . . .	46
31	2018/11/6 に右舷 MRS から取得された電圧の元データ . . . . .	47
32	2018/11/6 に左舷 MRS から取得された電圧の元データ . . . . .	48
33	2018/11/6 に SPC から取得された流量の 1 分間移動平均 . . . . .	48
34	降雨データの除外 . . . . .	49
35	解析対象データのヒストグラム . . . . .	50
36	解析対象データ相対風速/風向の風配図 . . . . .	50
37	飛沫量と有義波高 2 次元ヒストグラム . . . . .	51
38	飛沫量と出会い周期 2 次元ヒストグラム . . . . .	51
39	飛沫量と船速 2 次元ヒストグラム . . . . .	51
40	飛沫量とピッチ振幅 2 次元ヒストグラム . . . . .	52
41	飛沫量とピッチ周期 2 次元ヒストグラム . . . . .	52
42	飛沫量と相対風向 2 次元ヒストグラム . . . . .	52
43	飛沫量と相対風速 2 次元ヒストグラム . . . . .	53
44	飛沫量と船首方向からの風速 2 次元ヒストグラム . . . . .	53
45	停船時の Pitch RAO . . . . .	54
46	縦揺れ角と最大波傾斜の比と出会い周期の関係 [41] . . . . .	55
47	ERA5 から得られる有義波高分布ローズ . . . . .	57
48	飛沫量と ERA5 より取得した出会い周期の 2 次元ヒストグラム:固有周期付近拡大図 . . . . .	58
49	飛沫量と相対波向の 2 次元ヒストグラム . . . . .	58
50	飛沫量と船長波長比の 2 次元ヒストグラム . . . . .	58
51	飛沫量と有義波高の 2 次元ヒストグラム . . . . .	59
52	飛沫量と波形勾配の 2 次元ヒストグラム . . . . .	59
53	「みらい」で観測された出会い周期と ERA5 より推測した出会い周期 . . . . .	60
54	飛沫量と ERA5 から求めた相対風向の 2 次元ヒストグラム . . . . .	61

55	飛沫量と ERA5 から求めた船首方向からの風速の 2 次元ヒストグラム . . . . .	61
56	飛沫試験航行の初期計画概要 . . . . .	63
57	第一回飛沫試験：航跡 . . . . .	67
58	第一回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化 . . . . .	67
59	第一回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化 . . . . .	68
60	第一回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化 . . . . .	68
61	第二回飛沫試験:航跡 . . . . .	69
62	第二回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化 . . . . .	70
63	第二回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化 . . . . .	70
64	第二回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化 . . . . .	70
65	第三回飛沫試験:航跡 . . . . .	71
66	第三回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化 . . . . .	72
67	第三回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化 . . . . .	72
68	第三回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化 . . . . .	72

## 表目次

1	Icing Class[9] . . . . .	16
2	船体着氷の要因別割合 [16] . . . . .	18
3	SPC の主要目 [38] . . . . .	22
4	MRS の主要目 [18] . . . . .	24
5	RTR-505-V (子機) の主要目 [14] . . . . .	24
6	RTR-500C (親機) の主要目 [14] . . . . .	25
7	「みらい」の主要目 . . . . .	26
8	SMet システムによる観測パラメーター . . . . .	29
9	SOAR システムによる観測パラメーター . . . . .	30
10	水平姿勢計・方位計の要目 . . . . .	31
11	保有している「みらい」の動搖特性に関するパラメータ . . . . .	32
12	利用した ERA5 データ一覧 . . . . .	34
13	本節で用いられる主な記号およびパラメーター . . . . .	36
14	飛沫計検証試験 2 で用いたノズルの基本性能および試験環境 . . . . .	38
15	試験 2 で用いたノズルの基本性能および噴霧圧力 . . . . .	41
16	試験 2 で用いたノズルの基本性能および噴霧圧力 . . . . .	42
17	実施時の状況 . . . . .	64
18	各試験航海実施時の風・波の平均値 . . . . .	65
19	第一回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ . . . . .	66
20	第二回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ . . . . .	69
21	第三回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ . . . . .	71

# 1 序論

## 1.1 北極への注目の高まり

近年、北極海における海氷量が減少していることが報告されている。図1は、IPCC第4次評価報告書で用いられた13の気候モデルによる9月における海水域面積の長期予測(破線)と人工衛星観測による9月における海水域面積(赤線)の比較である。この図に示される通り、北極域の海水域面積は減少傾向が確認されており、この海氷減退が太陽光の吸収・海水温の上昇を引き起こし、将来的には北極海の海氷が消滅することもシミュレーションで予測されている。

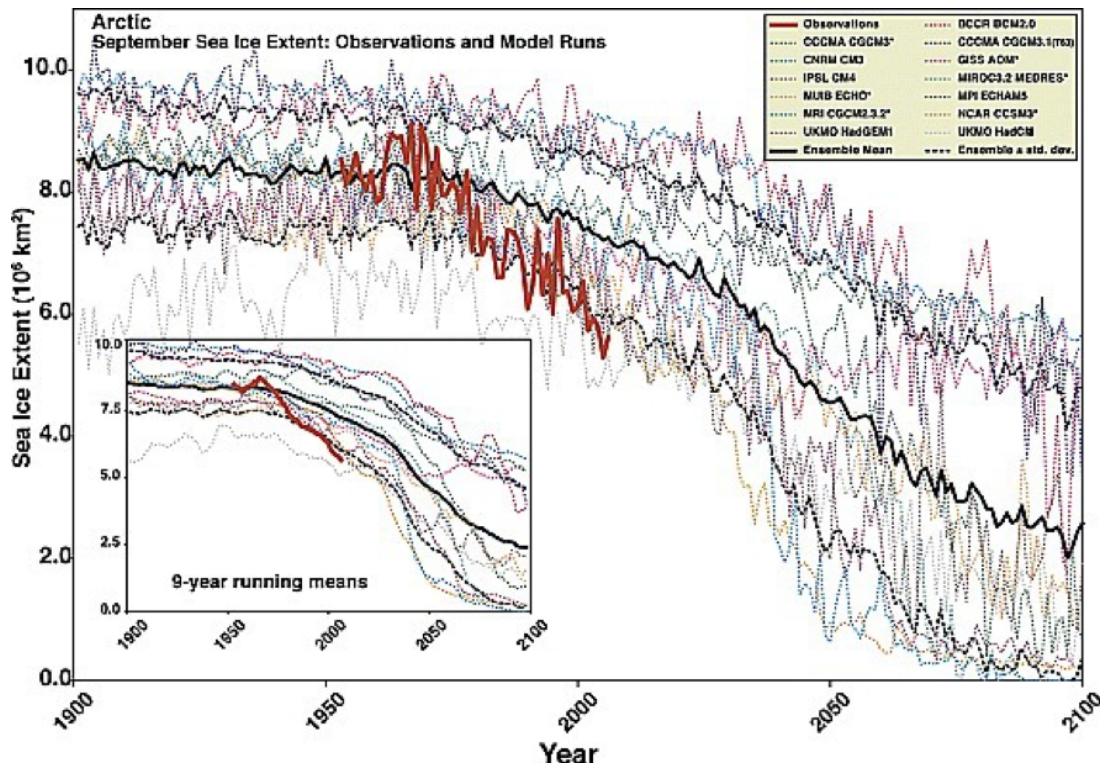


図1 衛星による観測値(赤)と数値モデルによる(破線)海水域面積の比較 [13]

海氷減少の影響で先住民の生活基盤や生態系への不可逆な影響、海面上昇などが深刻視される一方で、利用可能海域の拡大や北極海における航路の確立による経済的可能性に全世界から注目が集まっている。このような北極をめぐる国際社会の関心の高まりを受けて、平成27年、我が国政府の総合海洋政策本部（本部長・安倍晋三首相）は、北極海地域の初の基本政策である「北極政策」を決定した。本政策の基本的な考え方は、

- ・日本の強みである科学技術をグローバルな視点で最大限活用し、
- ・脆弱かつ復元力が低い北極の環境や生態系に十分配慮し、
- ・「法の支配」の確保と平和で秩序ある形での国際協力を推進し、
- ・先住民の伝統的な経済社会基盤の持続性を尊重し、
- ・北極における安全保障をめぐる動きに十分な注意を払い、
- ・気候・環境変動の影響への経済的・社会的適合を目指し、
- ・北極海航路や、資源開発に関する経済的な可能性を探求すべく、

### 具体的な取組を進める

とされている [23]。その中において、日本は高度な科学技術力を生かして北極政策に積極的に関わることを表明している。現在は、文部科学省が北極の研究開発、国土交通省が航路利用、外務省が国際協力といった具合に個別に政策設計が進められている。

また、最近では、2018年10月19日から21日までレイキャビク（アイスランド）で開催された国際会議「北極サークル（Arctic Circle）」において、河野太郎外務大臣により、開会式後の基調講演の中で日本の北極政策の紹介（新たな北極域国際研究プラットフォームとしての碎氷機能を有する北極域研究船の建造等に向けた検討を進めていることなど）とともに極地研のArCS、ADS、VENUSの取組について言及して注目を集めた [33]。この基調講演は我が国が国際的な北極政策/研究について今後も積極的に関わっていくことを明確に表明したものである。

## 1.2 ArCS：北極域研究推進プロジェクト

北極サークルで河野外務大臣が言及した「北極域研究推進プロジェクト（ArCS: Arctic Challenge for Sustainability）」は、文部科学省の補助事業として、国立極地研究所、海洋研究開発機構及び北海道大学の3機関が中心となって、2015年9月から2020年3月までの約4年半にわたり実施される、我が国の北極域研究のナショナルフラッグシッププロジェクトである。

ArCSは

- ・北極の環境変動メカニズムやその影響をより明確にし、
- ・持続可能な北極利用を推進するための高精度将来予測や環境影響評価につなげ、
- ・国内外の意思決定者や先住民コミュニティなどのステークホルダーへの情報提供を行うとともに

- ・北極に関する諸問題に関する社会的な興味・関心を喚起できるよう、
- ・活動成果を一般の人々も含めて伝えていくこと

を目的としている [2]。この目的を達成するために、図 2 のように 8 つのテーマを設定し、海洋地球研究船「みらい」による北極観測や ADS, VENUS の構築、一般の人々に向けた講演会などを通じて日本の極域の有効利用や社会的関心の向上へ貢献している。

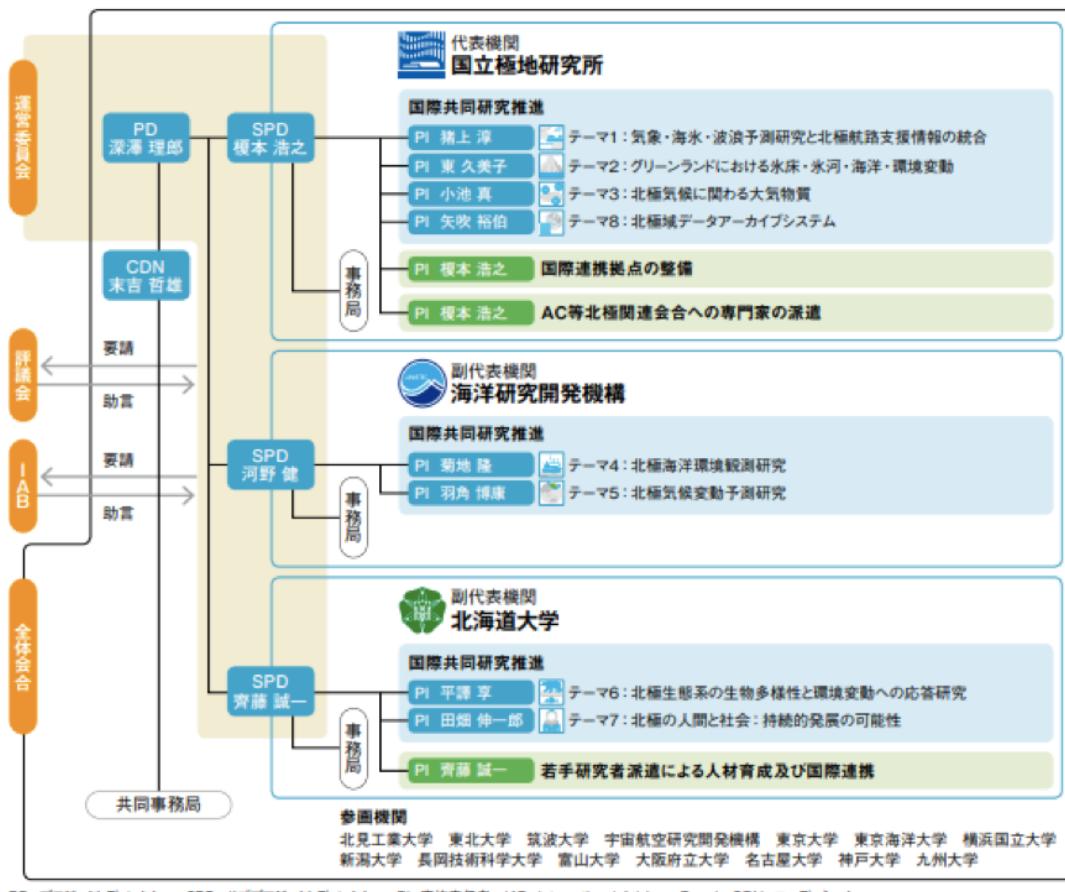


図 2 ArCS 実施体制および課題一覧 [2]

北極域データアーカイブシステム (ADS: Arctic Data archive System) は、北極域研究の「ビッグデータ」の相互流通を推進し、それらのデータに新たなる価値を生み出すことを目的として作成された図 3 のようなシステム (<https://ads.nipr.ac.jp/>) である [25]。

また、船舶用衛星データ配信システム (VENUS: VEssel Navigation Unit support System) は観測データや予測データを統合し、極域航海に必要な情報を提供するシステムである。これらのデータは図 4 に示すように一度 ADS に集約された後、航海支援情報として極地を航海する「みら



図3 ADSにおけるデータ流通の概念と国際連携 [25]

い」や「しらせ」へ送信される。このように我が国は北極域の有効な活用に向けた取り組みを世界的に見ても高い水準で行なっている。

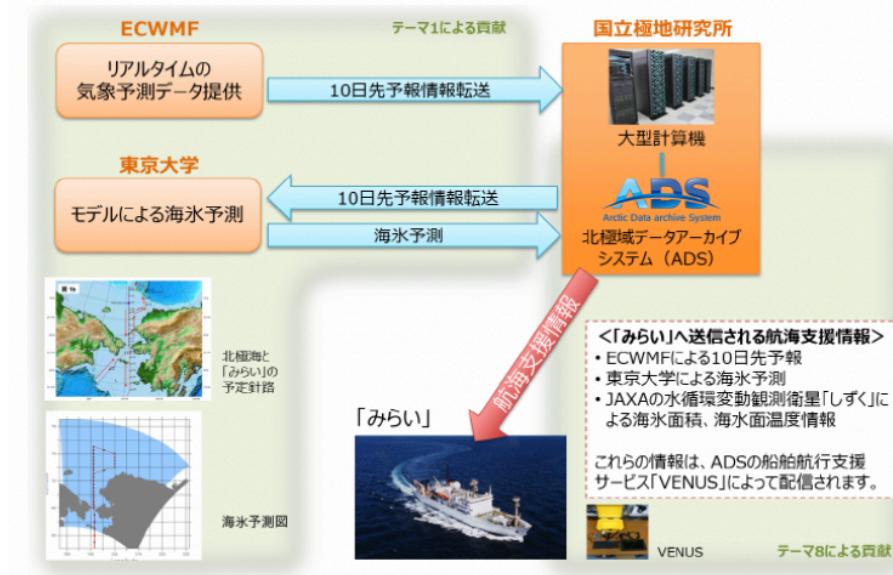


図4 観測データのフロー図 [25]

### 1.3 北極海航路 (NSR)

先に述べたように北極の海氷減少に伴い、北極海を航路として利用可能となりつつある。図 5 に従来航路 (Current route) と北西航路 (Northwest Passage) および北極海航路 (Northern Sea Route) を示す。横浜—ロッテルダム間を北極海航路を利用して航行した場合、スエズ運河を通過する従来航路に比べて 30-40% の距離が削減される。燃費の削減や輸送時間の短縮などのメリットが期待できるため、北極海航路は地球温暖化への適応策であると同時に、抑制策ともなる稀有な例であると言える。

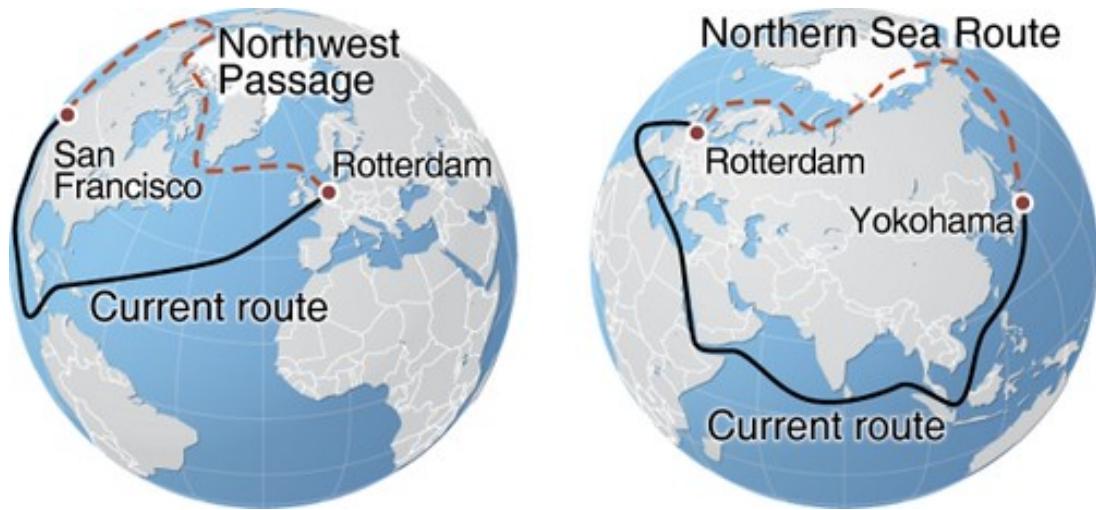


図 5 従来航路と北極海航路 [5]

しかしながら、北極海は寒冷であるがゆえに通常の海域では見られない、リスクが存在する。船体が海氷の中で動けなくなり閉じ込められることや、船自体が凍りつく船体着氷、氷況によって定時制が保てないこと、さらに海難救助の問題や海上事故による油流出への対応など、新たに生じる課題は多い [19]。これらの課題は、海氷の存在や気温の低さが主な原因であり、人工衛星画像や気象予報データなどを用いて、適切に航路を選定し、所要時間やコストを評価していくことが重要である。現在、北極海航路航行評価は、中野 (2015) [20]、今井 (2015)[22]、岡田 (2019)[21] などにより行われている。A\*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立し、様々な妥当性評価を行なっている。これらの研究は国際北極海航路計画 (INSROP, International Northern Sea Route Programme) で提唱されたアイスインデックス法を用いて氷況に応じた船速推定を行い、A\*アルゴリズムを使用して航路を選定するものである。しかし、これらの航路選定において船体

着氷は適切に評価されていない。これは、北極海を航行する、特に大型船に対する着氷のリスクがこれまで十分に解明されていないことが原因としてあげられる。次章ではこの船体着氷について詳細に説明していく。

## 2 船体着氷

船体着氷とは、寒冷海域航行において頻繁に発生する、船体に氷が付着する現象のことを指す。船体着氷が発生すると、甲板作業効率の低下、甲板機器等の機能の低下、転倒または落水のリスクの増加等の悪影響が生じる。さらに着氷が進行すると、トップヘビーとなり船体の復原力が低下することが知られている。小型船舶だと最悪の場合、船体が姿勢維持困難になり、転覆する恐れもある [40]。

### 2.1 一般的な知見

#### 2.1.1 発生メカニズム

通常、船体着氷は海水飛沫が主要因であると言われている。荒天時に航行した船体が波しぶきを浴び、甲板上構造物等に付着した水滴が低温化で凍結することによるものである。また、他にも霧、雪、みぞれ、雨や結露などの水分が甲板構造物に付着することで起こる場合もある。凍結に至るまでのプロセスを考える場合、現場海域の気象・海象のほか、船舶の載荷状態、船体運動、甲板構造物の位置・形状など様々な情報を考慮する必要があり、詳細なメカニズムの解明は困難を極めている。

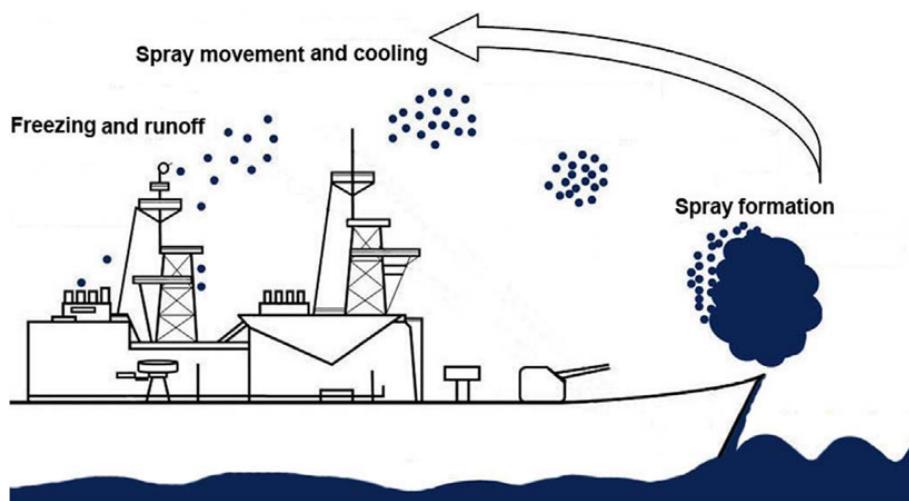


図 6 船体着氷発生のメカニズムの模式図 [3]

一般に、着氷の進行速度は気温、海水温、風速と密接な関係があることが知られている。気温が摂氏マイナス 2 度以下、風がビューフォート風力階級で 5 に達した場合、船体着氷はいつでも

起こりうるものとされている。一方気温が摂氏マイナス 16 度以下になった場合、飛沫粒子が船舶に付着する前に凍結する為、着氷が起こりにくいとされている [26]。

### 2.1.2 予防策

着氷を防ぐには、波しぶきを回避するよう船舶の針路・速力の調整が有効であると一般に認識されている。具体的には、船首動揺を防ぐための速力の調整、静穏または温かい海域に向けた針路変更などである。また、海氷域では海氷の影響で風・波が穏やかであることが多いため、故意に海氷域に侵入して激しい着氷を回避できる場合がある [26]。

別の予防策として、船体に改良を加えることが挙げられる。ヒーターの利用や、着氷を防ぐ塗料、着氷を防ぐ機能性纖維を用いたカバーなどの開発が進んでいる。しかし、船体全てで用いるには、コスト上問題があり、実現には至っていない [35]。

また着氷の起こりやすさを表す指標として、着氷指標 PR が予報として広く利用されている。着氷指標に関しては 2.2.1 で詳細を述べる。

### 2.1.3 着氷発生時の対応

現在、着氷が発生した場合の除去方法は木槌で叩くなどの対処療法的対応しか行えていない。着氷除去作業は、低温化の作業で非常に過酷である。また、多くの場合、甲板上も凍結し滑りやすい状態となっているため、常に転倒・落水の危険が伴う。必要に応じ、安全帽・安全靴・安全帯などの着用をする等、対策を行う必要がある。

着氷があまりにも激しく、除去作業も十分に行えず、深刻な事態が予想される場合は、船舶は最寄りの避難港または海岸に向かうための針路を変更することをためらうべきではない [26]。

## 2.2 着氷に関する先行研究

### 2.2.1 着氷指標 PR

現在広く使われている着氷指標として、Overland(1986)[9][10] による着氷指標 PR がある。この指標は、風速  $V$ 、結氷温度  $T_f$ 、気温  $T_a$ 、海面温度  $SST$  からなり、式 1 によって求められる。

$$PR = \frac{V(T_f - T_a)}{1 + 0.3(SST - T_f)} \quad (1)$$

この式は熱収支を考えて導出された指標である。海水凍結により放出される熱フラックス ( $Q_f$ ) は、対流熱フラックスを ( $Q_c$ )、着氷面に衝突する飛沫からの熱フラックスを ( $Q_d$ ) としておおよ

そ次式のようなエネルギー収支が成り立っている。

$$Q_f = Q_c + Q_d \quad (2)$$

また、それぞれの熱フラックスは塩水の凝固による顯熱フラックス ( $L_{fs}$ )、着氷質量フラックス ( $R_i$ )、海水と大気の比熱 ( $c_w, c_a$ )、飛沫フラックス ( $R_w$ )、凍結率 ( $n$ )、大気、氷の密度 ( $\rho_a, \rho_i$ )、結氷温度 ( $T_f$ )、海水面および大気の温度 ( $SST, T_a$ )、着氷率 ( $\frac{dh}{dt}$ ) を用いて次のように定義される。

$$Q_f = L_{fs}R_i \quad (3)$$

$$Q_d = c_w R_w (T_f - SST) = c_w \frac{R_i}{n} (T_f - SST) \quad (4)$$

$$Q_c = \rho_a c_p C_H V (T_f - T_a) = kV (T_f - T_a) \quad (5)$$

$$R_i = \rho_i \frac{dh}{dt} \quad (6)$$

これらの式を整理すると

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\frac{k}{L_{fs}\rho_i} V (T_f - T_a)}{1 + \Phi (SST - T_f)} \propto PR \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{c_w}{n L_{fs}} \quad (8)$$

となる。ここで  $\Phi$  は観測値から得られる 0.3 または 0.4 を用いることが多い。以上から、着氷指標 PR は着氷率を比較的簡単な計算で求められるように導出された指標であると言える。この着氷指標 PR と着氷の深刻度 (Icing Class) は Overland(1990)[10] により表 1 のように定義されている。

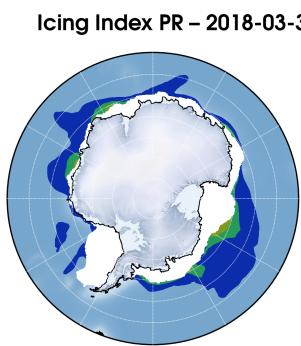
表 1 Icing Class[9]

PPR	<0	0-22.4	22.4-53.3	53.3-83.0	>83.0
Icing Class	None	Light	Moderate	Heavy	Extreme
Icing Rates (cm/hour) (inches/hour)	0	<0.7 <0.3	0.7-2.0 0.3-0.8	2.0-4.0 0.8-1.6	>4.0 >1.6

なお、本指標に対しては下記の点のような問題点が指摘されている [1]。

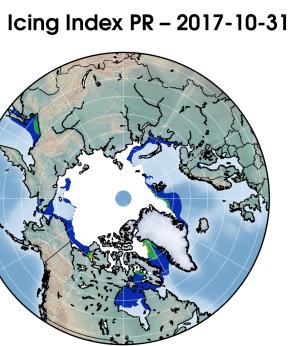
- 船舶の形状・サイズを考慮に入れていない
- 海水飛沫の特性を考慮に入れていない
- 激しい船体動揺による海水飛沫を考慮できていない

また、Icing Class を ECMWF の ERA-Interim のデータを用いて、南極周辺、北極周辺で示したもののが図 7、8 である。なおこの図を得るために計算における結氷温度は、 $-1.8^{\circ}\text{C}$  として計算を行っている。



Data: ECMWF—ERA interim

図 7 2018/3/31 の南極周辺の着氷指標



Data: ECMWF—ERA interim

図 8 2017/10/31 の北極周辺の着氷指標

これらの図からわかるように、寒冷海域の広い範囲において、船体着氷のリスクがある事が見て取れる。特に北半球の寒冷海域では、人の居住区域が近いこともあり、船体着氷のリスクは身近に認識されている。

## 2.2.2 海水飛沫と船体着氷の関係

着氷指標 PR は世界的に広く使われる指標であるが、船舶の形状や船体動揺、海水飛沫の特性等を十分に考慮できていない点が問題としてあげられている。ここで、船体着氷の主な要因が何であるかということが問題となってくる。そこで、表 2 に Zakrzewski (1987) らが調査した船体着氷の要因と割合を示した。海洋全域において着氷の 89% は海水飛沫単体によって引き起こされる。また最も海水飛沫の寄与率が低い北極域のような高緯度帯においても 50% であり、41% は霧・雨・雪の影響を伴うとされる。このように、船体着氷を引き起こす主な原因は海水飛沫であることが判明している [16]。

表 2 船体着氷の要因別割合 [16]

### Causes of icing of ships

Region	Total number of observations	Cause of icing (%)			Reference
		Sea spray	Spray and fog or rain or snow	Other types	
All seas	400	89(82) <sup>1</sup>	7(16) <sup>1</sup>	4(2) <sup>1</sup>	Shehtman (1968)
North Pacific	3000 <sup>2</sup>	89.8	7.5	2.7	Aksjutin (1979)
North Atlantic					
Arctic	Unknown	50.0	41.0	9.0	Aksjutin (1979)
Gulf of St. Lawrence	100	81.0	2.0	17.0	Brown and Roeber (1985)
Scotian Shelf	536	94.2	3.0	2.8	Brown and Roeber (1985)
Grand Banks	100	97.0	2.0	1.0	Brown and Roeber (1985)
NE Newfoundland Shelf	233	95.9	1.4	2.8	Brown and Roeber (1985)
Labrador Sea and Davis Strait	72	86.9	11.1	1.7	Brown and Roeber (1985)

<sup>1</sup>Reported cases of fast growth of ice are given in parenthesis, if known.

<sup>2</sup>Makkonen (1984) and Shellard (1974) mentioned more than 2000 cases of icing.

## 2.3 海水飛沫に関する研究

これまでの研究から船舶における海水飛沫の発生には相対風速、相対風向、出会い周期などが関係することが明らかにされている。Shiga et al. (2015) [12] は第 55 次南極地域観測隊 (JARE55) における海水飛沫量と平均風速の相関を解析した。図 9 は飛沫量の対数と相対風速をプロットした図である。志賀らは相対風速と飛沫粒径・飛沫量にある程度の正の相関があることを示し、風速、船速、船首方位から飛沫量を予測できる可能性を示唆した。

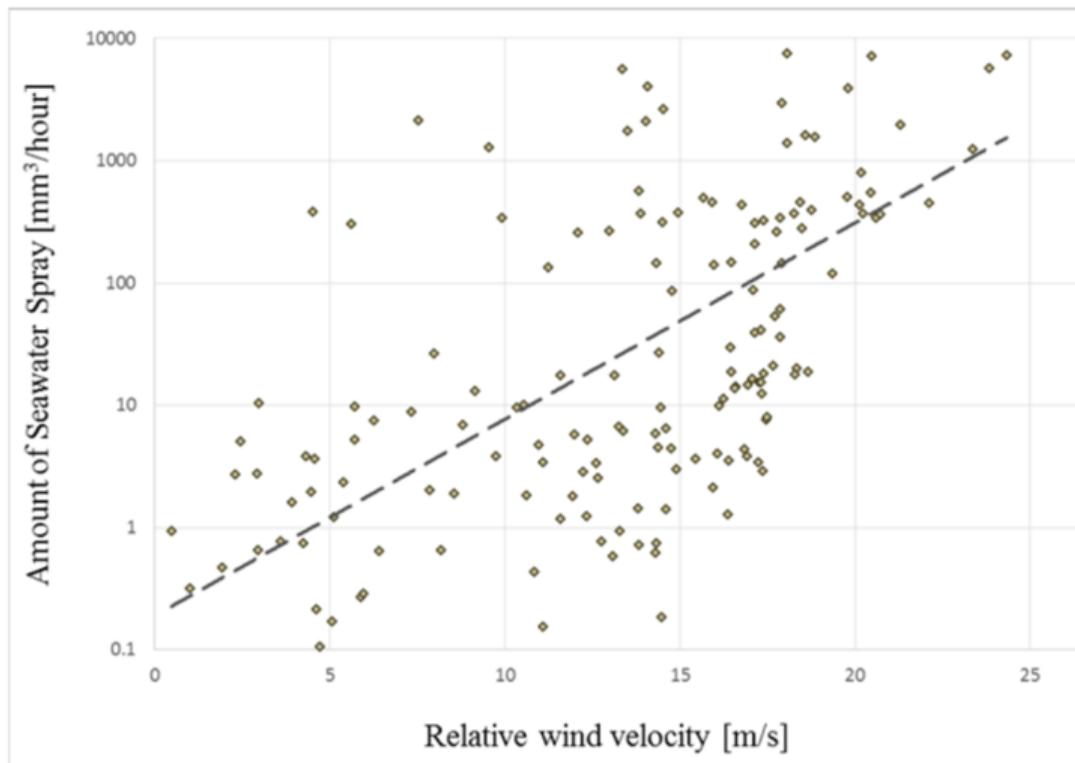


図 9 JARE55 における海水飛沫量と相対風速の相関図 [12]

また、戸田 (2017)[39] は相対風速が小さい場合にも飛沫量が少ない場合に着目し、飛沫量と出会い周期との関連性に関する仮説を立て、サンプル数は少ないものの一定の関連性があると示唆する結果を得た。

## 2.4 本研究の目的

本研究においては北極航海 2018 により得られた飛沫データを解析し、これまで明確にわかつてない出会い周期と飛沫量の関係性について解釈を得ることを目的とする。

また、ERA5 気象・海象データセットと組み合わせて飛沫量の大きくなる箇所における傾向を見いだすことで、大規模な着氷発生予想に役立つ結果を得ることを目的とする。

### 3 利用した観測機器/設備/船舶/データセット

本章では解析に用いたデータ取得のために用いた観測機器/設備/船舶/データセットについて説明していく。

#### 3.1 飛沫観測装置

本研究においては、船舶へ飛来する飛沫を定量的に観測するために、SPC・MRS の 2 種類のセンサーを利用している。

##### 3.1.1 Spray Particle Counter(SPC)

Spray Particle Counter(SPC) は以下の図 10,11 の様な装置で、センサー部を通過した粒子の粒径と数を測定することができる光学的センサーである [17]。元々は飛雪粒子を計測するために開発されたものであるが、改良して水しぶきを計測可能なものとなっている。ロガーは雨風をしのげる室内に設置し、ケーブルを伸ばして SPC と繋いでいる(図 12)。SPC の仕様は表 3 に記載した。



図 10 SPC 本体

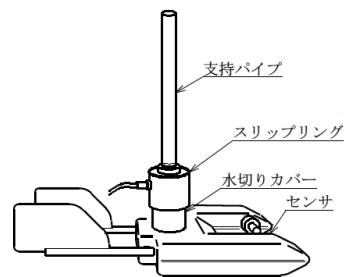


図 11 SPC センサー部 [37]

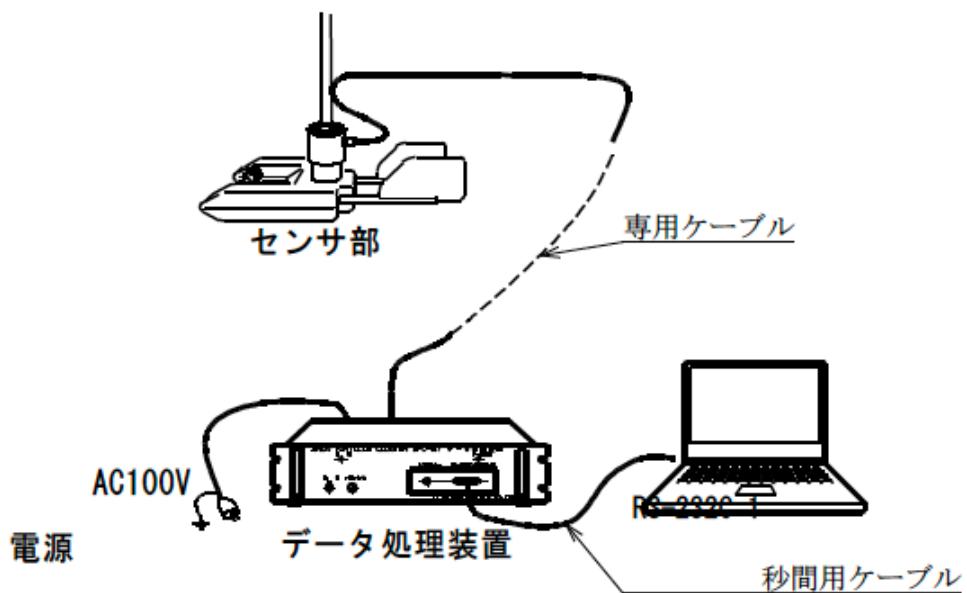


図 12 SPC センサーと記録装置の模式図 [37]

表 3 SPC の主要目 [38]

検出方式	平行光線内を通過する雪粒子(水滴)による減光量の検出
粒径測定範囲	100 $\mu$ m～1000 $\mu$ m (32 ステップに分割・検出物は球形とする)
応答周波数	1KHz～30KHz
電 源	+15V 150mA 以下 -5V 50mA 以下 (処理部から供給)
信号出力	粒子の断面積に比例した波高の单一パルス
測定領域	幅 25mm × 高さ 3mm × 奥行 1.0mm
光 源	コリメーター付スーパールミネッセントダイオード ( $\lambda = 830\text{nm}$ )
受光素子	集光レンズ付 PIN フォトダイオード
総合利得	250 倍 (ノンアンダーシュート-NUS-アンプによる)
動作温度範囲	+ 0°C～20°C (調整基準温度 = 0°C)

SPC は、測定領域を通過した  $100\mu\text{m}$  から  $1000\mu\text{m}$  の粒子を 32 ステップに分割して検出し 1 秒おきに記録する。本研究においては、検出する粒径を  $d_i$ 、検出された粒径  $d_i$  の粒子の個数を  $n_i$

とし次式 9 のように 1 時間当たりの流量 (mm/h) に換算して利用している。

$$SPCflux[mm/h] = \sum_{i=1}^{32} \frac{(d_i \cdot n_i)}{25 \cdot 3} \cdot 60 \cdot 60 \quad (9)$$

### 3.1.2 Marine Rain gauge type Spray gauge(MRS)

Marine Rain gauge type Spray gauge(MRS) は以下の図 13,14 の様な装置で、船舶用雨量計 (Young, CYG-50202)[18] を飛沫観測用に改造した静電容量式のセンサーである。この船舶用雨量計は 2006 年以降トライトンブイにも利用されている [6]。一般に使われる転倒マス式の雨量計では観測できない船体動揺に対応するために、雨水をチューブ内に貯めて、その静電容量に応じて電圧を出力する仕組みとなっている [15]。また、雨水がいっぱいまでたまると、サイフォンによって排出し、自動的に繰り返しの計測ができるようになっている。飛沫観測用に図 14(a) の飛沫捕縛部を取り付けることで横からくる飛沫を計測可能としている。MRS の主要目は表 4 の通りである。



図 13 MRS 本体

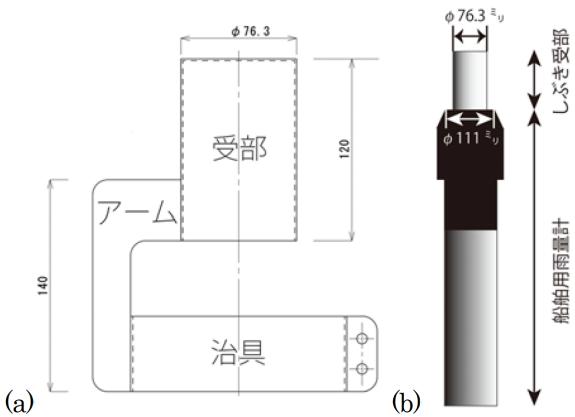


図 14 MRS の飛沫捕縛部 (a) と取り付け概略図 (b)

サンプリング間隔は 30 秒である。流量の計算においては尾関ら (2015)[15] と同様に飛沫捕縛部の投影面積を断面積として 1 時間当たりの流量 [mm/h] に換算したものを利用している。 $\Delta V$  を単位時間における出力電圧の変化量、 $\Delta T$  をサンプリング間隔 [s] として、換算式は下記の式 10 のように表される。

表 4 MRS の主要目 [18]

計測レンジ	500mL
起動雨量	1mm
精度	± 0.2V
出力	0-5V/0-500mL
動作温度範囲	-20-50°C
電源 (ヒーター)	48W
電源 (計測)	8-30V/3mA

$$MRSflux[mm/h] = \frac{100 \cdot \Delta V}{76.3 \cdot 120} \cdot 1000 \cdot (60 \cdot 60 / \Delta T) \quad (10)$$

また、データを記録するロガーは雨風をしのげる室内に設置し、ケーブルや無線で MRS と繋いでいる。ロガーは下記に記す RTR-500 シリーズを用いた。

■RTR-500 シリーズ RTR-500 シリーズは温度・湿度をはじめとする多様な測定項目を計測・記録するデータロガー（子機）と、記録データを無線通信で収集する親機とで構成されている [14](図 15)。MRS の記録システムにおいて、子機に RTR-505-V を、親機に RTR-500C を利用している。それぞれの仕様を表 5,6 に示す。この記録システムを採用している場合、子機は本体とケーブルでつなぎ、親機は室内で PC と直接繋いで、記録を無線接続により PC に保存している。

表 5 RTR-505-V (子機) の主要目 [14]

測定対象	電圧 1ch
測定範囲	0-22V
主な精度	± 5mV ± 読み値の 0.3%
本体動作環境	無線通信をする場合 : -30-80 °C
防水性	IP64

表 6 RTR-500C (親機) の主要目 [14]

通信	USB/シリアル通信/光通信/特小無線通信
本体動作環境	-10-60°C(外部電源仕様時: -30-60°C)
防水性	なし



図 15 おんどとり Jr 電圧用 RTR-505V (左上) /大容量バッテリーパック (左下)/RTR-500 親機 (右)

### 3.2 海洋地球研究船「みらい」

「みらい」は日本初の原子力船「むつ」を 1995 年に船体を切断し、原子炉を一括撤去して再利用可能部分を元に普通のディーゼル機関を搭載した船舶である。「みらい」の主要目は下の表 7 の通りである [31]。

耐氷構造の採用や、減揺装置を搭載した世界でも最大級の大型海洋観測船であり、極域や荒天時の観測も可能となっている。「みらい」の主なミッションは、海洋の熱循環・物質循環・生態系の解明および海洋底ダイナミクスの解明、および海洋観測ブイの展開であり、そのための設備が図 16 のように数多く搭載されている [32]。

「みらい」の過去の観測記録は JAMSTEC 文書カタログ [29] にてクルーズレポートの形で

表 7 「みらい」の主要目

項目	値
全長	128.5m
幅	19.0m
深さ	10.5m
喫水	6.9 m
総トン数	8706t
航海速力	約 16knots
航続距離	約 12000NM
最大搭乗員	研究者および乗組員合計 80 名

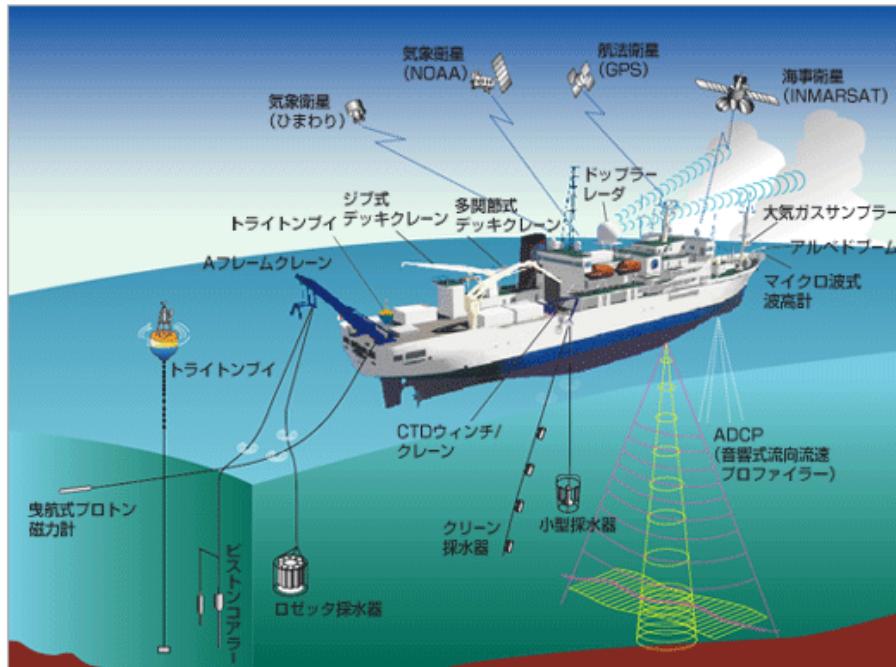


図 16 「みらい」に搭載された主な観測システム [32]

公開されている [8]。また、過去の航海にて取得されたデータは航海・潜航データ・サンプル探索システム (DARWIN:Data and Sample Research System for Whole Cruise Information in JAMSTEC) において公開されている [30]。

以降の項では、本研究に利用することのできる総合海上気象海象観測装置 (SMet: MIRAI Surface Meteorological observation system, SOAR: Shipboard Oceanographic and Atmospheric

Radiation measurement system)、船上三成分磁力計 (STCM:Ship board Three Component Magnetometer)、マイクロ波式波高系から取得されるデータについて記載していく。また、最後に JAMSTEC から提供いただいた「みらい」応答関数についても説明する。

### 3.2.1 MIRAI Surface Meteorological observation system(SMet)

「みらい」には図 17 のように、二種類の気象センサ一群が存在する。

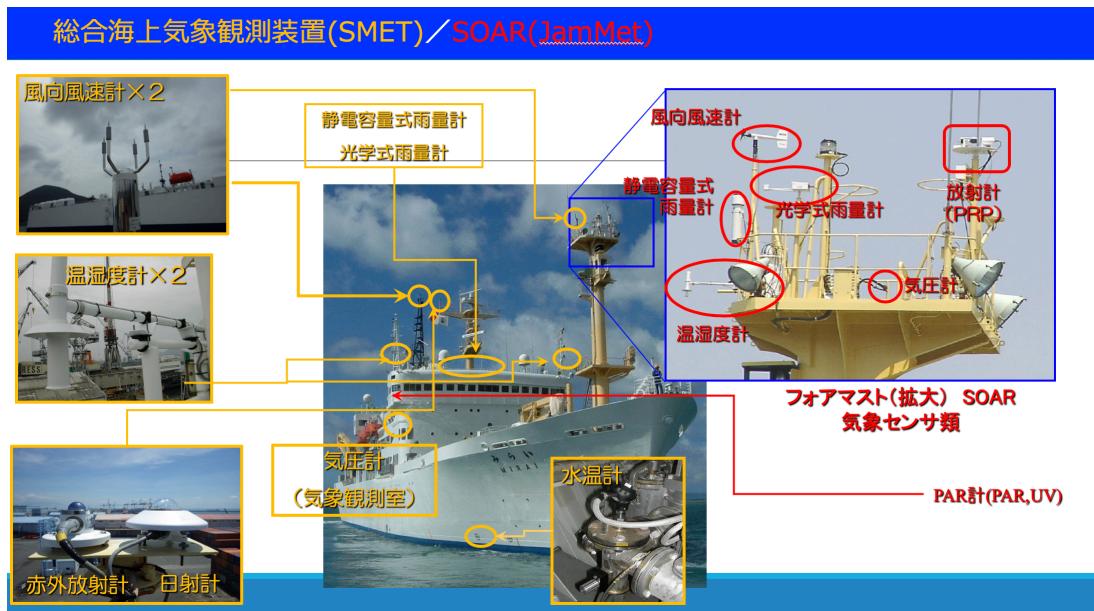


図 17 「みらい」搭載の海上気象観測装置

そのうちの一つが、SMet である。SMet は表 8 の観測パラメータを取得するためのシステムである [8]。それぞれのデータは 6 秒間の平均データとして出力されている。

表8 SMet システムによる観測パラメーター

Parameter	Units	Remarks
1 Latitude	<i>deg</i>	
2 Longitude	<i>deg</i>	
3 Ship' s speed	<i>knot</i>	Mirai log, DS-30 Furuno
4 Ship' s heading	<i>deg</i>	Mirai Gyro, TOKYO-KEIKI,TG-8000
5 Relative wind speed	<i>m/s</i>	6sec./10min. averaged
6 Relative wind direction	<i>deg</i>	6sec./10min. averaged
7 True wind speed	<i>m/s</i>	6sec./10min. averaged
8 True wind direction	<i>deg</i>	6sec./10min. averaged
9 Barometric pressure	<i>hPa</i>	adjusted to sea surface level, 6sec. averaged
10 Air temperature (starboard)	<i>degC</i>	6sec. averaged
11 Air temperature (port side)	<i>degC</i>	6sec. averaged
12 Dewpoint temperature (starboard)	<i>degC</i>	6sec. averaged
13 Dewpoint temperature (port side)	<i>degC</i>	6sec. averaged
14 Relative humidity (starboard)	<i>%</i>	6sec. averaged
15 Relative humidity (port side)	<i>%</i>	6sec. averaged
16 Sea surface temperature	<i>degC</i>	6sec. averaged
17 Rain rate (optical rain gauge)	<i>mm</i>	/hr hourly accumulation
18 Rain rate (capacitive rain gauge)	<i>mm</i>	/hr hourly accumulation
19 Down welling shortwave radiation	<i>W</i>	/m <sup>2</sup> 6sec. averaged
20 Down welling infra-red radiation	<i>W</i>	/m <sup>2</sup> 6sec. averaged
21 Significant wave height (bow)	<i>m</i>	hourly
22 Significant wave height (aft)	<i>m</i>	hourly
23 Significant wave period (bow)	<i>s</i>	hourly
24 Significant wave period (aft)	<i>s</i>	hourly

### 3.2.2 Shipboard Oceanographic and Atmospheric Radiation measurement system(SOAR)

SOAR は Brook National Laboratory(BNL) により設計された、主に下記の 4 つの項目を観測するためのシステムである [8]。具体的な観測パラメーターは表 9 の通りである。

- short and long wave downward radiation
- wind pressure, and rainfall (by a capacitive rain gauge)
- air temperature, relative humidity and rainfall (by optical rain gauge (ORG))
- Photosynthetically Available Radiation

表 9 SOAR システムによる観測パラメーター

Parameter	Units	Remarks
1 Latitude	deg	
2 Longitude	deg	
3 SOG	knot	
4 COG	deg	
5 Relative wind speed	m/s	
6 Relative wind direction	deg	
7 Barometric pressure	hPa	
8 Air temperature	degC	
9 Relative humidity	%	
10 Rain rate (optical rain gauge)	mm/hr	
11 Precipitation (capacitive rain gauge)	mm	reset at 50mm
12 Down welling shortwave radiation	W/m <sup>2</sup>	
13 Down welling infra-red radiation	W/m <sup>2</sup>	
14 Defuse irradiance	W/m <sup>2</sup>	
15 PAR	microE/cm <sup>2</sup> /sec	

### 3.2.3 Ship board Three Component Magnetometer(STCM)

STCM のデータは、三軸のリングコア型フラックスゲート磁力センサーにより計測した磁力値から、地磁気異常値を算出したものである。船体磁場の影響を取り除くために、船体運動のデータが必要となるため、RAW データには本観測の一環として、水平姿勢計・方位計(表 10)により計測された船体運動 Roll,Pitch,Yaw 成分が格納されている。なお、DARWIN を通じて公開されている STCM データは、Isezaki(1986)[7] によって船体磁気補正計算後の三成分地磁気異常値の時空間情報のみであり、船体動揺データは収納されていないため、動揺成分を利用するためには、DARWIN お問い合わせページから元データを依頼する必要がある。

表 10 水平姿勢計・方位計の要目

メーカー	IXBLUE
型式	PHINS
精度 (Roll,Pitch)	0.01°
精度 (Gyro)	0.01° *Secant(Lat)
設置場所	ドップラーレーダドーム内

### 3.2.4 動揺特性 (RAO)

「みらい」に関しては、JAMSTEC から RAO の計算結果をいくつか提供いただいている。表 11 に現在保有している RAO に関するパラメータを記載する。

表 11 保有している「みらい」の動揺特性に関するパラメータ

パラメータ	値
RAO の種類	pitch/heave/roll
船速	0/12[knot]
相対波向 <sup>*1</sup>	0/30/60/90/120/150/180[deg]
船長波長比	0.1-4.0 の間で 0.1 おき

この離散的にしか分かっていない状態で利用するのは困難であるため、本研究においては、全ての船速・相対波向・船長波長比の 3 変数について 3 次線形補間を行うことで RAO の値を連続値として利用可能な状態とした。なお、補間の際には下記のような仮定を置いている。

- RAO の値が左右対称 (210/240/270/300/330[deg] も既知)
- 船速が 12knot を超える場合は 12knot と置き換える
- 船長波長比が 4.0 を超える場合は 4.0 と置き換える

以降「みらい」の RAO は上記のように補間された関数より出力するものとする。この RAO の一例として、図 18 にピッチ揺れの RAO を描画したものを示す。なお、図 18 において、動径は船速を、偏角は相対波向を表す。

---

<sup>\*1</sup> 入射波の進行方向が船首方向となす角を表す。追い波の時 0deg、向かい波の時 180deg となる。船首方向を基準として波が抜けていく方向。

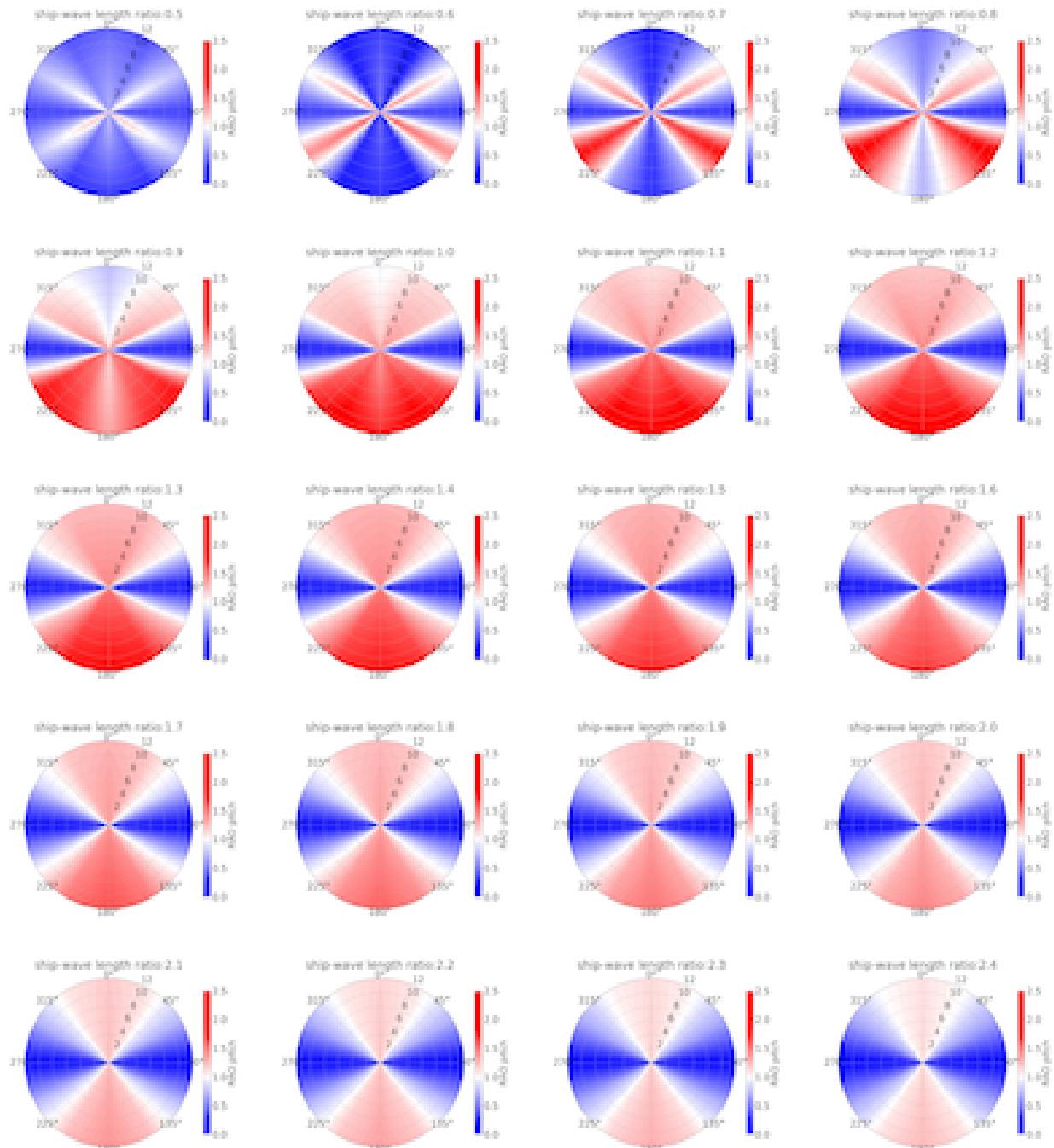


図 18 船長波長比 0.5-2.4 における「みらい」ピッチ揺れの RAO

### 3.3 ERA5

ERA5 は、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）が公開している、モデル計算やデータ同化システムを使用して、膨大な量の過去の観測結果を元に大気、海洋、陸地の様々な気候変数を一時間おきに推定したデータセットである。データセットは Copernicus Climate Change Service(C3S) 上で公開されている。本研究においては、下記表 12 のデータ群を、飛沫観測実施期間において、空間解像度  $0.125^{\circ}$ 、時間解像度 1 時間のデータを取得した。なお、表の略称は ERA5 データセットに格納されているデータを呼び出すための文字列である。

表 12 利用した ERA5 データ一覧

データ名	略称	単位	パラメータ ID <sup>*2</sup>
10 metre U wind component	10u	m/s	165
10 metre V wind component	10v	m/s	166
Total precipitation	tp	m	228
Significant height of combined wind waves and swell	swh	m	140229
Mean wave period	mwp	s	140232
Mean wave direction	mwd	deg	140230

ERA5 と観測値と比較する場合、ERA5 の値が ECMWF の予測システムにより算出された値を指定した時空間グリッド上で統計処理を施した値であり、地形・植生・建築物・ミクロなタイムスケール等の影響を考慮できていない点に留意する必要がある。

以降は ECMWF parameter database[4] に記載されていたデータの詳細情報を日本語でまとめたものである。

#### 3.3.1 10 metre U wind component(10u)

10u は地上 10m における、風速の東西方向成分である。東に向かって吹く場合を正とし、単位は m/s となっている。

<sup>\*2</sup> ECMWF parameter database での検索で必要になる ID

### 3.3.2 10 metre V wind component(10v)

10v は地上 10m における、風速の南北方向成分である。北に向かって吹く場合を正とし、単位は  $m/s$  となっている。

### 3.3.3 Total precipitation(tp)

tp は地表面に降り注ぐ、雨や雪などの液体の、もしくは凍結した水の時間当たりの総量である。霧や露、地表面に降り注ぐまでに蒸発した降水といった要素は含まない。降水量はデータ抽出の際に指定した時間間隔に基づいて計算されるため、今回のケースでは 1 時間おきの降水量を表している。また、降水量の単位は深さ  $m$  で記述される。この深さは、グリッド内での降水がグリッド内全てに広がった場合の降水の深さとなる。

### 3.3.4 Significant height of combined wind waves and swell(swh)

swh は風うねりにより生じた海洋波の平均  $1/3$  有義波高となっている。また、この場合の波高は、波の谷と山の垂直距離を示しており、単位は  $m$  となっている。

海洋波は一般に、複数の波高、波長、波向を持つ波が組み合わさって成り立っている（波浪スペクトル）。波浪スペクトルは同一の時空間上で風により直接的に発生する風浪および、異なる時空間上で発生するうねりからなることが知られており、本パラメーターはその両方の影響を含む。

より厳密には、このパラメーターは波浪スペクトルの 0 次モーメントの平方根の 4 倍となっている。

### 3.3.5 Mean wave period(mwp)

mwp は固定点における連続する 2 つの海洋波の山が通過するために要する平均時間を表している。単位は  $s$ 。swh と同様に風浪、うねり両方の影響を含み、波浪スペクトルの全ての周波数、方向からもとまる周期の平均値となっている。

### 3.3.6 Mean wave direction(mwd)

mwd は海洋波の平均波向を表している。単位は degree で表され、0 は北から波がやってくることを、90 は東から波がやってくることを示す。swh と同様に風浪、うねり両方の影響を含み、波の方向スペクトルの全ての周波数、方向からもとまる周期の平均値となっている。

### 3.4 計算によって取得できるデータ

ERA5 から取得される海洋波の平均周期から、海洋波の波長・位相速度を求めることが可能となる。また、海洋波の種々のパラメータと船舶の速度・船首方向などを組み合わせることにより RAO や出会い周期の計算が可能である。

表 13 本節で用いられる主な記号およびパラメーター

記号	単位	パラメーター
$g$	$m/s^2$	重力加速度
$c$	$m/s$	海洋波の波速
$\lambda$	$m$	海洋波の波長
$\omega$	$rad./sec$	海洋波の周波数
$T_w$	$sec$	海洋波の波周期
$\zeta_a$	$m$	海洋波の振幅
$\omega_e$	$rad./sec$	出会い波周波数
$T_e$	$sec$	出会い波周期
$L$	$m$	船長
$V$	$m/s$	船速
$\chi$	$rad.$	相対波向
$h$	$m$	水深

#### 3.4.1 海洋波の波長・位相速度

まず、海洋波の波長・位相速度について、式 11 のような波の分散関係が知られている [27]。

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (11)$$

水深が十分に大きい箇所での波浪（深水波）においては、 $\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$  は 1 に近似できるため、式 11 は式 12 と置き換えることができる。

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (12)$$

深水波の仮定において、例えば 1% 以下の誤差でこの近似が成り立つのはおおよそ水深の 2 倍以下の波長の波に対してである [27]。また、一般に波の周期・波長・速度の関係は次式 13 で与えられる。

$$\lambda = T_w c \quad (13)$$

ERA5 データから、海洋波の平均周期が得られるため、式 13 と式 11 もしくは式 12 は波長と位相速度の連立方程式であると見做すことができる。

本研究においては、水深 50m 以下に対しては深水波の仮定を適応可能であるとして波長・位相速度を求めた。水深 50m 未満では式 13 と式 11 の非線形連立方程式を Powell のハイブリッド法 [24] を用いて数値解を求めた。本解法では波長・位相速度共にゼロへ収束してしまう箇所がごくわずかに存在したが、ゼロへ収束した箇所は前後の値から線形補間した。

### 3.4.2 波形勾配

波長・波高が既知の時、下記式 14 で定義される波形勾配を考えることができる。

$$\text{wave steepness} = \frac{\zeta_a}{\lambda} \quad (14)$$

### 3.4.3 出会い周期・出会い角速度

航行する船舶が体感で感じる波の周期・角速度を出会い周期・出会い角速度という。これらは海洋波の周期、船舶の速度、相対波向が既知の時、下記の式 15,16 で求めることができる。

$$T_e = \frac{\frac{gT_w^2}{2\pi}}{\frac{gT_w}{2\pi} + V_s \cos\chi} \quad (15)$$

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} \quad (16)$$

### 3.4.4 動搖振幅・周期

STCM の動搖データから動搖振幅・周期を求めることができる。動搖振幅は基準時刻より前 64 秒間の動搖データに対しヒルベルト変換をかけることで求まる、エンベロープ曲線の絶対値の平均値を求めることにより導出した。また、動搖周期は動搖データの自己相関関数から導かれるコレログラムの 0 より大きく最も 0 に近いピークから導出した。

## 4 飛沫観測機材の精度検証実験

### 4.1 実験背景

#### 4.1.1 過去の実験概要

本研究で用いた 2 種類の飛沫量センサー SPC と MRS について、尾関ら [15][11] は二つの試験方法での比較計測を行い精度検証を行なっている。

試験 1 は雪氷防災研究センターの雪氷防災実験棟の大型低温室において、2 つの飛沫計を並列に設置し、約 2m 離れた位置から扇型ノズルにより飛沫を供給し、30 分間の比較検討実験を行なっている。

試験 2 は北海道教育大学札幌校の屋外にテントを立て、その内部に 2 つの飛沫計を並列に設置し、約 1m 離れた位置から表 14 に示した 3 種類の扇型ノズルを用いて飛沫を供給し、比較検討実験を行なっている。

表 14 飛沫計検証試験 2 で用いたノズルの基本性能および試験環境

型番	噴霧圧力 MPa	噴角 deg	噴量 L/min
V80-07	0.2,0.4	80	0.8
VE115-59	0.14	105	4.2
VE115-31	0.2	100	4.8

試験 1、試験 2 の結果をそれぞれ、図 19・図 20 に示す。

試験 1 においては両しぶき計とも 1 分ごとの飛沫量に換算して比較を行っている。経過時間 23 分から 24 分の間は給水タンク差し替えのためにスプレーが止まった時間である。両者を比較すると、SPC はスプレーの開始、停止ともに即座に反応していることがわかる。一方 MRS は SPC の極大値からわずかに遅れて極大値を記録する傾向があることがわかる。これは、装置の特性上、飛沫受取部で捕捉された飛沫は、表面を流下し、雨量計の受水器に流入し記録されるため、時間差が生じることが原因と考えられる。

両機器の飛沫流量の合計はそれぞれ、SPC6.1mm、MRS6.5mm であった。

また、試験 2 においては、それぞれのノズルに対して量機器 10 分ごとの飛沫流量に関して比較を行っている。それぞれのノズルに対して数 mm 程度のズレはあるものの、これらはノズルから

噴霧される飛沫粒子の空間分布にムラが生じたもしくは、MRS は粒径の小さな飛沫粒子の捕捉率が悪いといった可能性があるものの、ほぼ同程度であると結論づけられている。

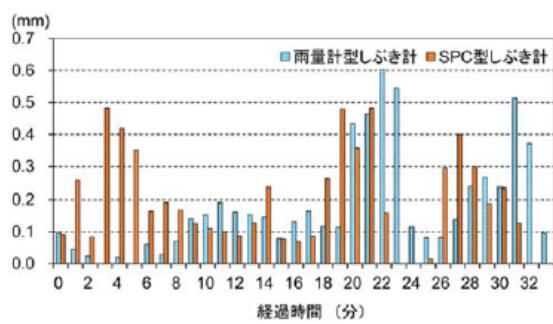


図 19 試験 1 における飛沫量の比較 [15]

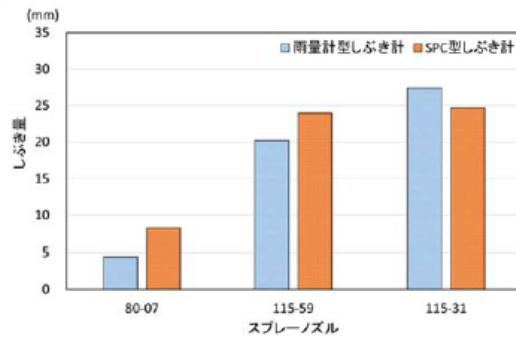


図 20 試験 2 における飛沫量の比較 [15]

#### 4.1.2 本実験の目的

これまでの実験においては、風速がゼロの環境下で行われている。一方で実海域の観測においては、非常に大きな風速下で、激しく揺れ動く船舶上での観測が行われており、センサーの種類によってセンサー周辺の空気の流れの乱れ等の影響から観測される飛沫量に影響が出る可能性が考えられる。したがって、本実験においては、大きな風速下において、おおよその飛沫粒径ごとにセンサーの有効性検討を行うことを目的としている。

## 4.2 実験環境

### 4.2.1 防災科学研究所低音風洞

本実験は 国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所雪氷防災実験棟 (CES: Cryospheric Environment Simulator) にある風洞装置 (図 21) を用いて、2018 年 9 月 24 日から 29 日の期間において行った。本風洞は通常の風洞内では困難である、雪の取り扱いが可能であることが特徴としてあげられる。風洞の測定部分の寸法は  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 14\text{m}$ 、風速は 0m から 25m、温度は  $-30^{\circ}\text{C}$  から  $25^{\circ}\text{C}$  で調整可能である。

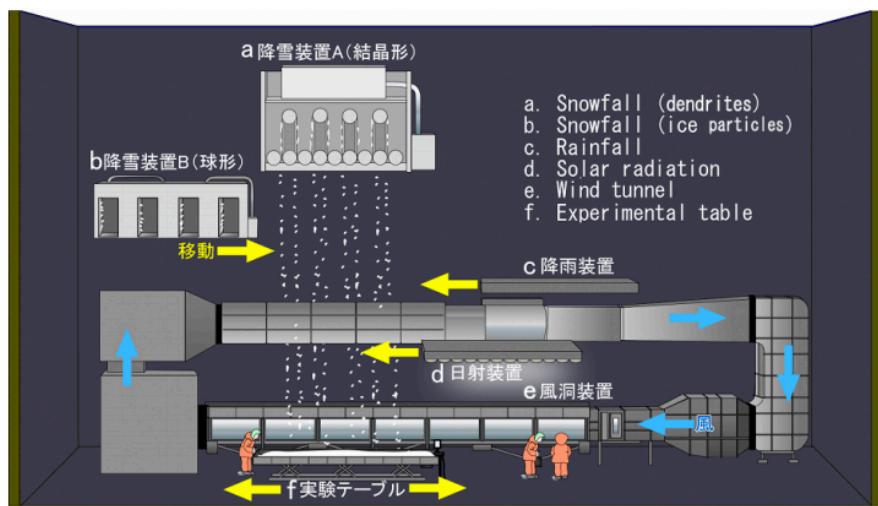


図 21 低温室内的実験装置 [36]

### 4.2.2 飛沫発生装置

本実験では飛沫を風洞内部で発生させるため、図 22 および図 23 のような装置を構築した。ポンプで汲み上げた水を風洞装置の内部に設置してあるスプレーノズルに誘導し噴霧する仕組みである。

水をくみ上げるためのポンプは寺田ポンプ製作所の水圧テストポンプ電動式 PP-401T[34] を使用した。また、霧を風洞内に噴霧するためのノズルには「霧のいけうち」製のスプレーノズル [43][42] を用いた。実験に用いたノズルの一覧を表 15 に示す。

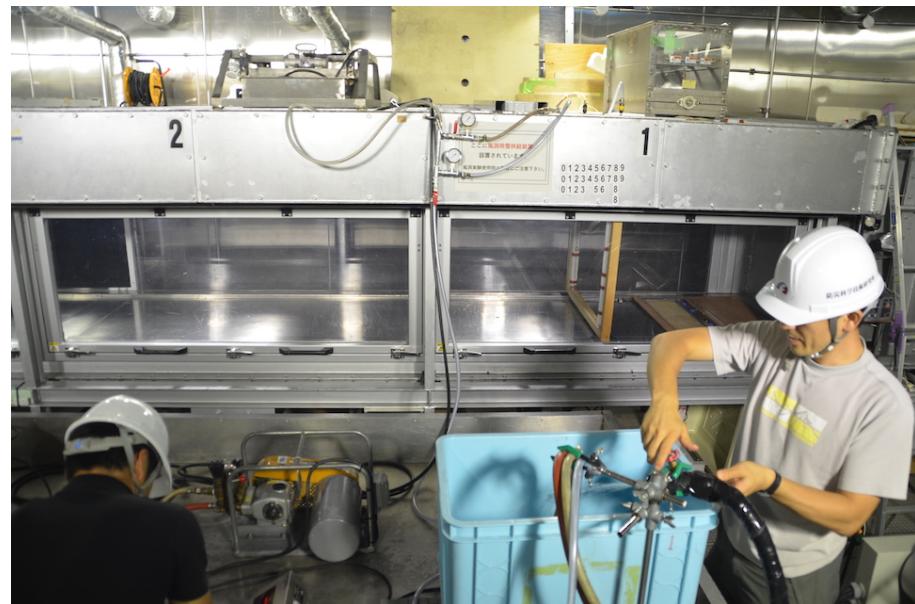


図 22 飛沫発生装置



図 23 飞沫発生ノズルの配置

表 15 試験 2 で用いたノズルの基本性能および噴霧圧力

型番	噴霧圧力 MPa	噴角 deg	噴量 L/min	おおよその粒子径 ( $\mu m$ )
KB063	0.5	60	1.69	45-60
KD042	0.3	93	0.42	130-200
KD084	0.3	95	0.84	200-260
KD224	0.2	80	2.24	310-420

### 4.3 実験条件

本実験におけるパラメータを表 16 に、風洞内における実験機材の配置を図 24 に示す。ノズルは 15 で示した 4 種類を用い、風速は 5m から 20m で 5m 刻み、温度は 4°C で固定し、計測時間は最低 15 分とした。

表 16 試験 2 で用いたノズルの基本性能および噴霧圧力

パラメータ	設定値
ノズル	KB063/KD042/KD084/KD224
風速	5/10/15/20 (m/s)
温度	4°C(固定)
時間	15 分間計測
設置角度	直立

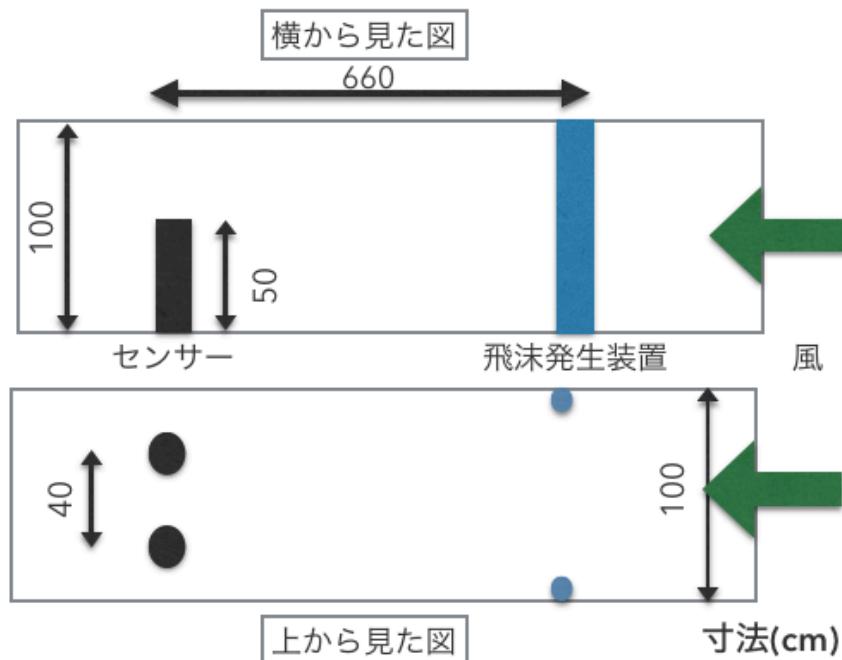


図 24 飛沫発生装置

## 4.4 実験結果

なお、解析においては 15 分のうち最初 2 分間のデータは破棄し、2 分から 12 分の出力値を 1 時間当たりの流量に換算して利用した。図 25-28 にノズルごと、つまりおおよその粒径ごとにまとめた SPC、MRS の計測値の時間変化を記載する。

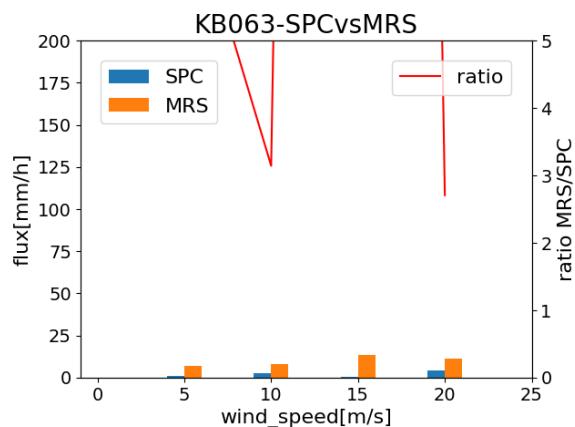


図 25 KB063 における飛沫量の比較

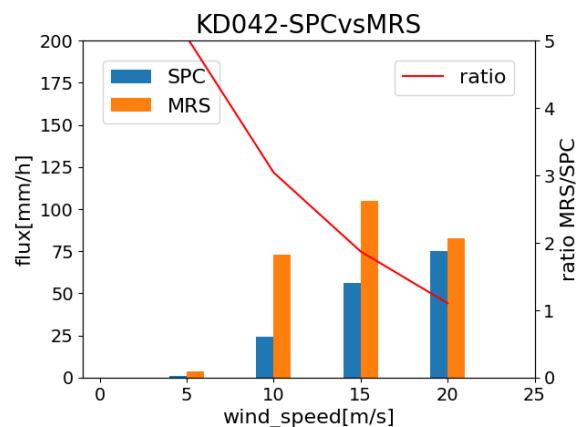


図 26 KD042 における飛沫量の比較

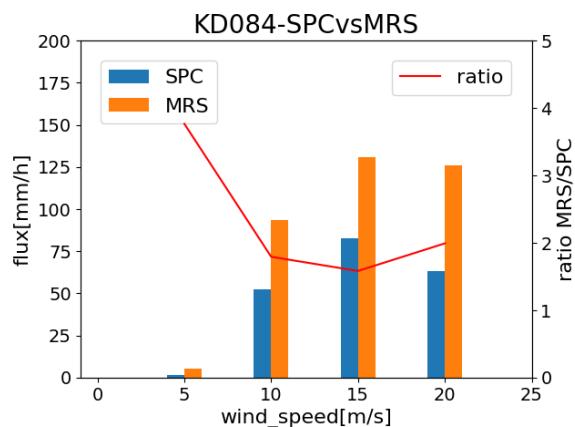


図 27 KD084 における飛沫量の比較

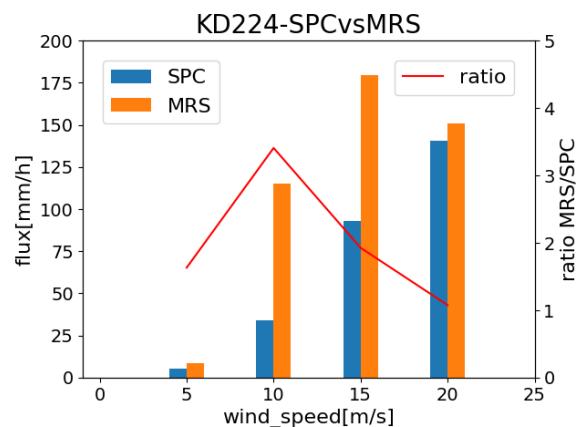


図 28 KD224 における飛沫量の比較

## 4.5 考察

全体を通して風速 5m/s の時は飛沫がほとんど計測されていない。これは、飛沫がセンサーまで十分届いていないことが考えられる。したがって、風速 5m/s の時は考察から除外する。

KB063 における飛沫量について、SPC はほとんどゼロであるのに対し、MRS はわずかではあるが飛沫を検出している。これは、SPC の測定レンジが  $100 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$  であることから飛沫粒子が衝突して大きくなつた場合を除き、SPC では検出できないことを意味しており、妥当な結果であると言える。

また、KD042 および KD224 において、SPC の流量はほぼ線形で増加しているのに対し、MRS は 20m/s の時に減少していることが確認された。これから、MRS は風速が強い場合に飛沫の一部を捕縛できていない可能性が示唆される。また、目視において、MRS の飛沫捕縛部から液滴が風により僅かではあるが吹き飛ばされているのが確認されている。

一方、KD084 では風速 20m/s において SPC の飛沫量が減少していることが見て取れる。この現象は KD042、KD224 においては見られないため、明確には説明し難い。風速 10m/s および 15m/s までは線形に近い変化を見せているため、20m/s において、何らかの影響で風洞内の飛沫の分布が大きく変化した可能性があるが、今後より検討していく必要がある。

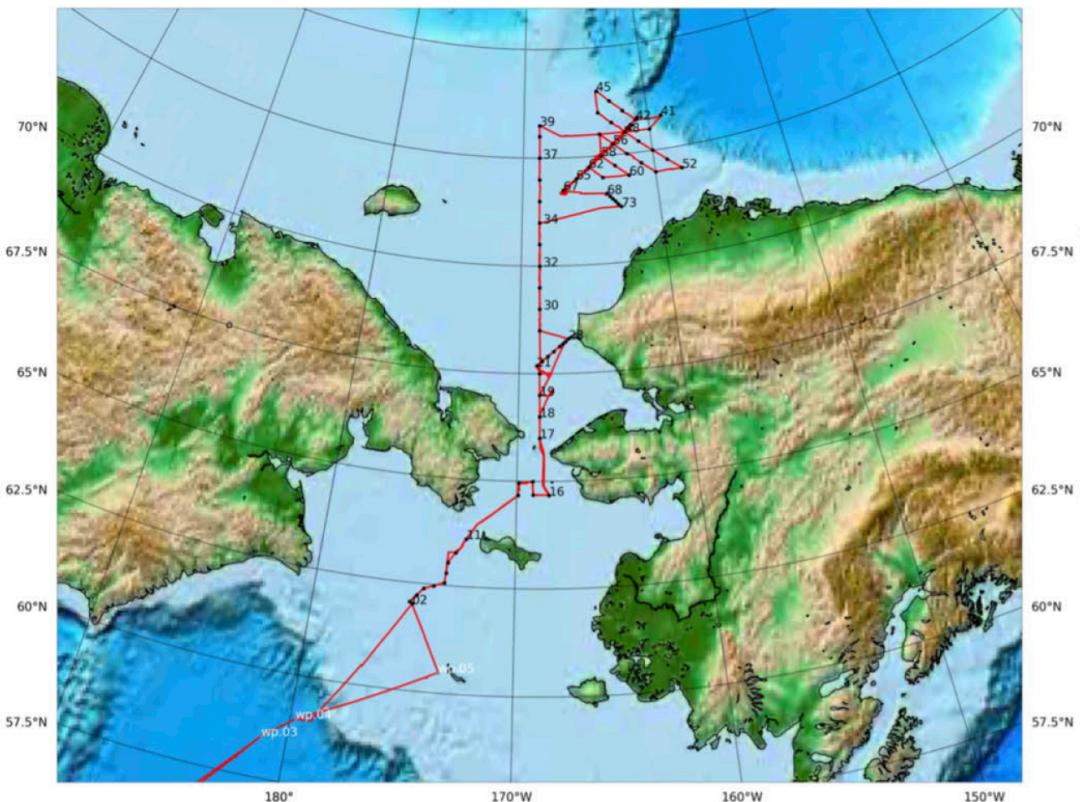
## 4.6 結論

今回の用いた 4 つのノズルのうち 2 つにおいて、風速が上がるにつれ MRS の飛沫捕縛効率減少する傾向が明確に見て取れた。実海域においては、風速のみならず、様々な粒径の飛沫が激しく揺れ動く MRS へと飛来する。海水飛沫が粒子としてではなく水塊としてやってくることも想定されるため、一律に補正することは不適切と考えられるが、SPC と MRS の値の比較においては、このような傾向があることに留意した上で行わなければならない。

## 5 「みらい」における観測

本研究で用いる飛沫データは MR18-05C は 2018/10/24-12/7 の期間で行われた「みらい」北極航海 2018(MR18-05C)[8] において取得している。MR18-05C の航跡を下記の図 29 に示す。本航海は世界気象機構 (WMO: World Meteorological Organization) の極域予測プロジェクト (PPP: Polar Prediction Project) の枠組みの基づいて行われる極域予測年 (YOPP : Year Of Polar Prediction) への貢献を目的として、大きく下記の 3 つの課題を達成するために行われたものである。

- 初冬北極海における海洋物理プロセスの解明に向けたデータ取得
- 実データに基づく、既存モデルの評価・改善
- 海氷発達期における基本的パラメータの時空間的変動のモニタリング



を一台設置した。図 30 に飛沫計の設置位置を示す。飛沫観測データは一部メンテナンス期間を除き、連続で取得されている。

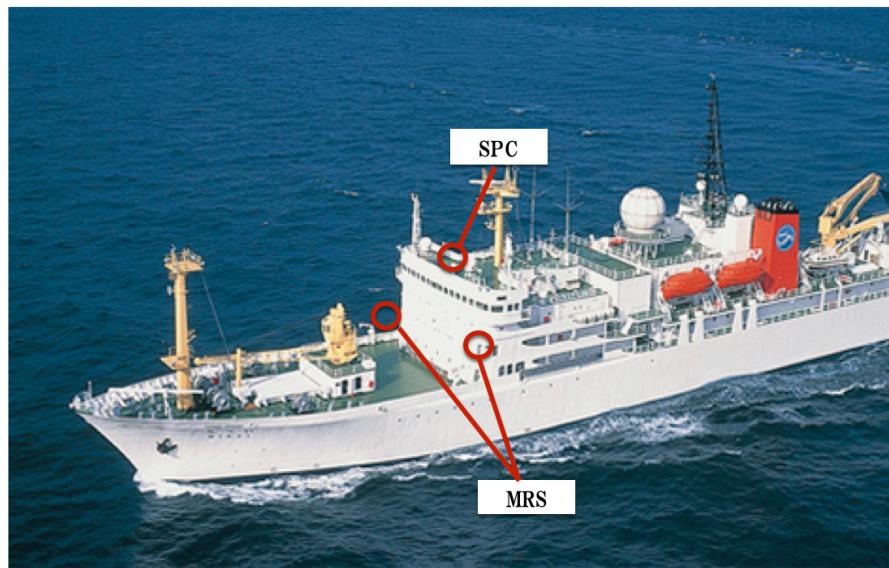


図 30 「みらい」における飛沫計設置箇所

## 5.1 飛沫観測データ

まず、それぞれのセンサーで取得したデータを確認していく。紙面の都合上全てを子細に掲載することは難しいが、ここでは 2018/11/6 のデータを一例として取り上げる。筆者の観測記録によると、午前 09:00 は小雪/晴れ、午後 15:00 は晴れとされる。

### 5.1.1 右舷 MRS で取得されたデータ

図 31 に右舷 MRS で取得されたデータを示す。右舷 MRS のデータは 0.2V 程度の変動が現れていることがわかる。しかしながら、MRS は原理的にこのような大きな電圧降下を生じることは、排水時を除きありえない。この電圧降下の原因は本論文執筆時点では不明である。仮に 10 分間で 0.2V の変動があった場合、一時間当たりの流量に換算すると 13.1mm/h になる。右舷 MRS に関してはこのような 0.2V 程度の変動が多数散見されているため、本研究においては、参考までに描画はするものの、データの信頼性は著しく低いものとし、考察の対象とはしないものとする。

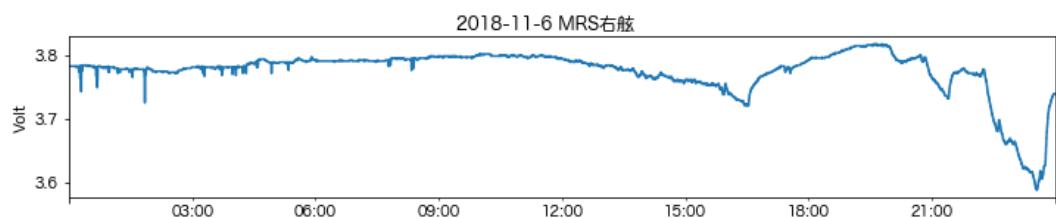


図 31 2018/11/6 に右舷 MRS から取得された電圧の元データ

### 5.1.2 左舷 MRS で取得されたデータ

図 32 に左舷 MRS で取得されたデータを示す。毎秒通過した粒径を記録しているが、左舷 MRS のデータは不自然な変動は見られない。04:00 および 06:00 ごろに少し上昇しているが、降水もしくは海水飛沫を観測したものと考えられる。掲載したデータのように左舷 MRS のデータは全期間を通じて安定した値を出力しており、データの信頼性は高いものとする。しかしながら小さな上下変動は度々生じており、小さな変動は度々生じている。この変動はセンサーへの液体流入によるものか、ノイズによるものか識別が極めて困難である。したがって、小さな流量に関しては、参考にできない。

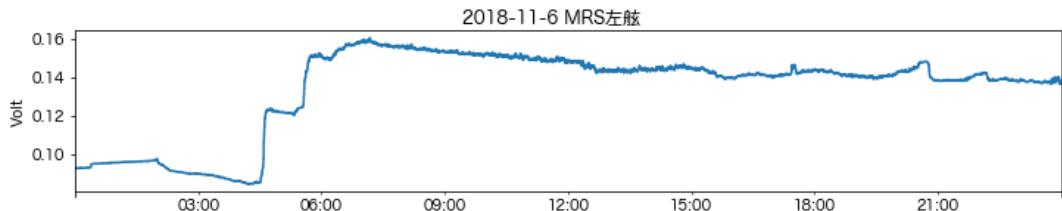


図 32 2018/11/6 に左舷 MRS から取得された電圧の元データ

### 5.1.3 SPC で取得されたデータ

図 33 に SPC で取得されたデータを示す。左舷 MRS と同様、04:00 および 06:00 ごろに少し上昇しているが、こちらも降水もしくは海水飛沫を観測したものと考えられる。このように SPC もある程度安定した出力をしており、データの信頼性は高いものとする。しかし、快晴時も細かな粒子が多数観測されていることが時折あり、小さな値に関しては参考にできない。また、空気を多く含む雪のような見かけ上の粒径が大きい粒子が通過した場合、大きな流量を出力することには留意すべきである。

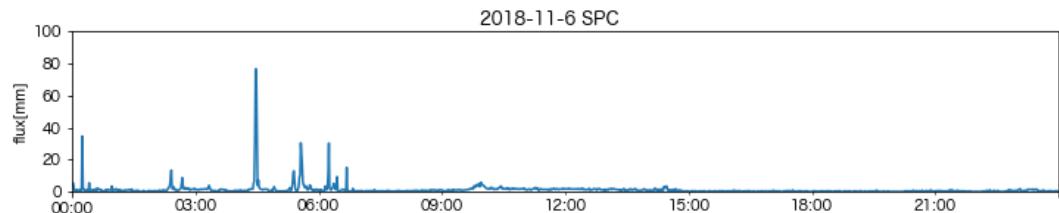


図 33 2018/11/6 に SPC から取得された流量の 1 分間移動平均

## 5.2 「みらい」で観測された飛沫と各種データとの関連

観測された飛沫データには降雨が含まれる。本研究においては図 34 のように、ERA5 の total precipitation の 0.01mm 閾値として、それ以上を降雨ありとして全て除外した。なお、3.3.3 でも述べたように、この降水量は、グリッド内での降水がグリッド内全てに広がった場合の降水の深さとなるため、局所的な降水が除外できていない場合があることに注意しなければならない。また、明らかに海象が穏やかな有義波高 0.5m 以下の場合および飛沫観測センサーに飛沫が届かないと考えられる船首方向からの風速が 0m/s 以下の場合は解析対象から除外した。なお、「みらい」には雨量計が計 4 つ取り付けられているが、光学式のものは飛沫を含む可能性が高く、静電容量式は、風速が強い場合雪が捕縛できない（計測部に雪が入らない）場合があるため、降雨の除外には利用しない。また、リサンプリング間隔は 1 分とする。

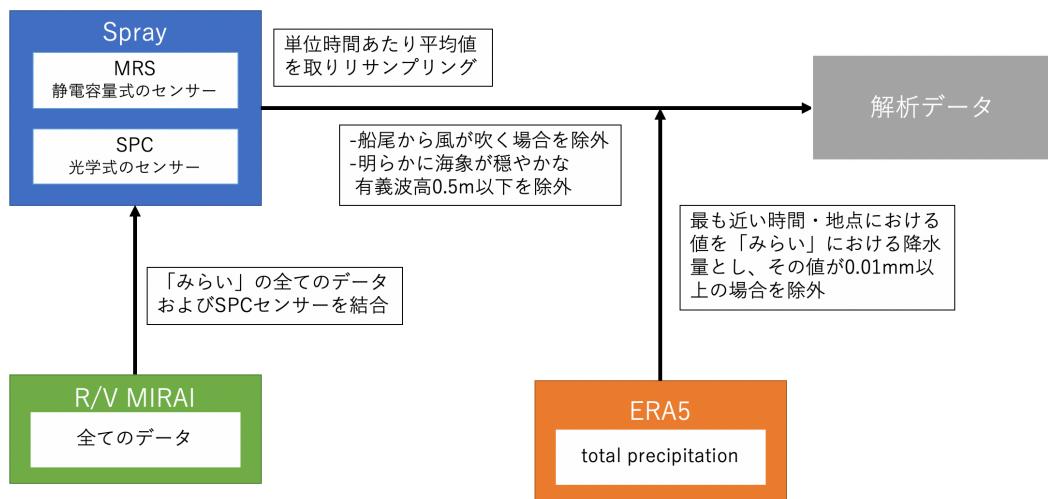


図 34 降雨データの除外

以上のような手順でデータを整形すると全データの 3.501%:1928 サンプルが解析対象データとなる。次に解析対象データは傾向を把握するため、図 35 に各種データのヒストグラムを、図 36 に相対風向/風速の風配図を記す。

また、下記に、各種センサーで計測された飛沫量と、有義波高・出会い周期・船速・ピッチ振幅/周期・船首方向からの風速との関係を表す二次元ヒストグラムを図 37-44 に記す。尚、二次元

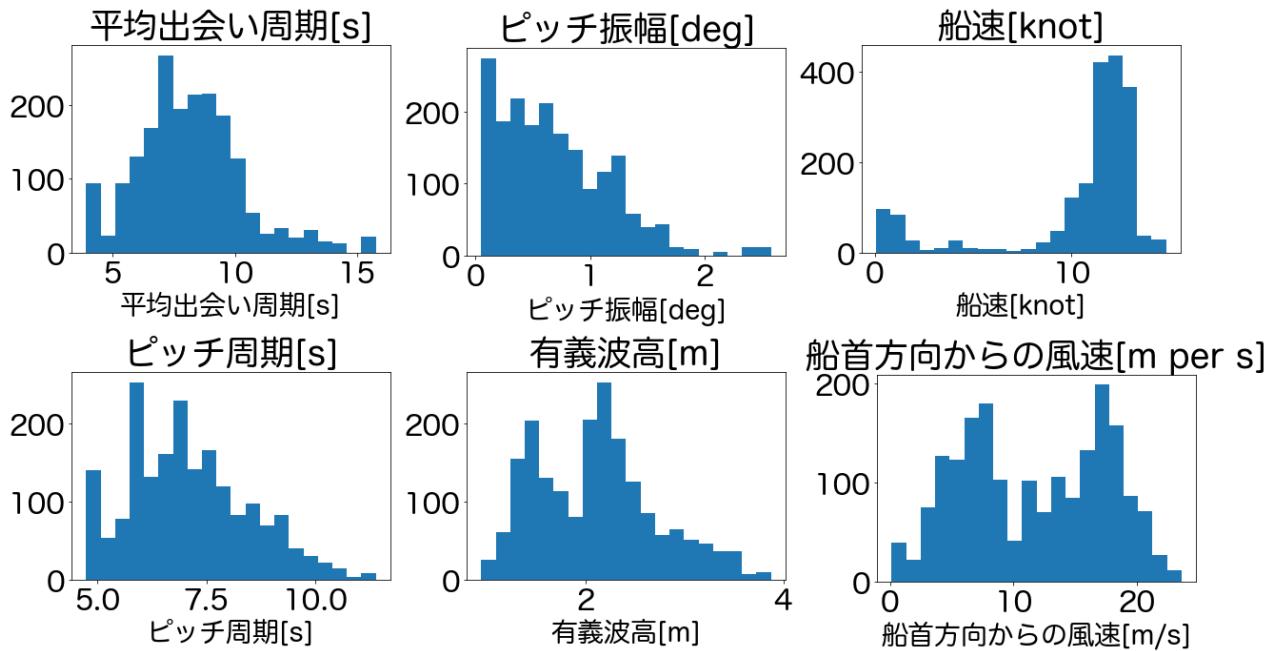


図 35 解析対象データのヒストグラム

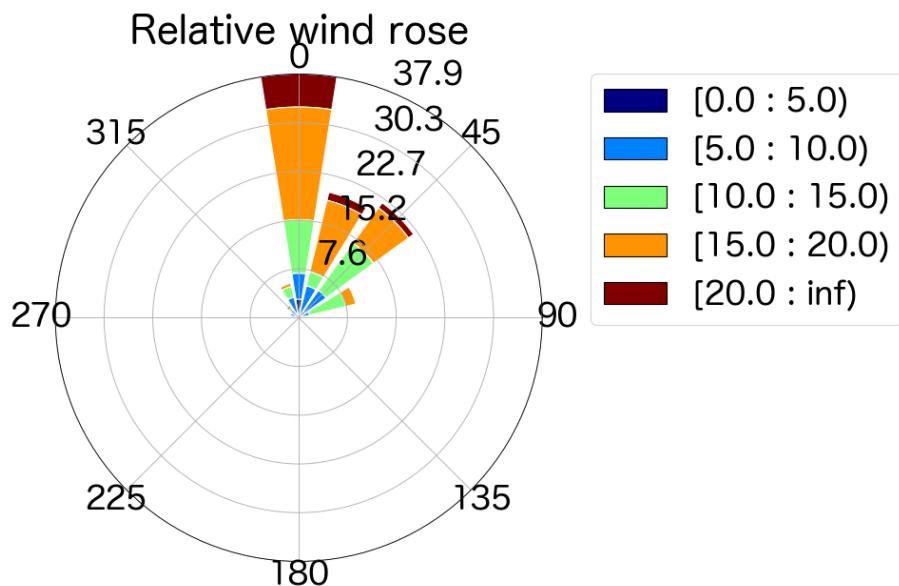


図 36 解析対象データ相対風速/風向の風配図

ヒストグラムの横軸は考慮するパラメータを、縦軸は各センサーで観測された飛沫量を表す。また、色はそのセル内に含まれるサンプルの対数度数を表している。

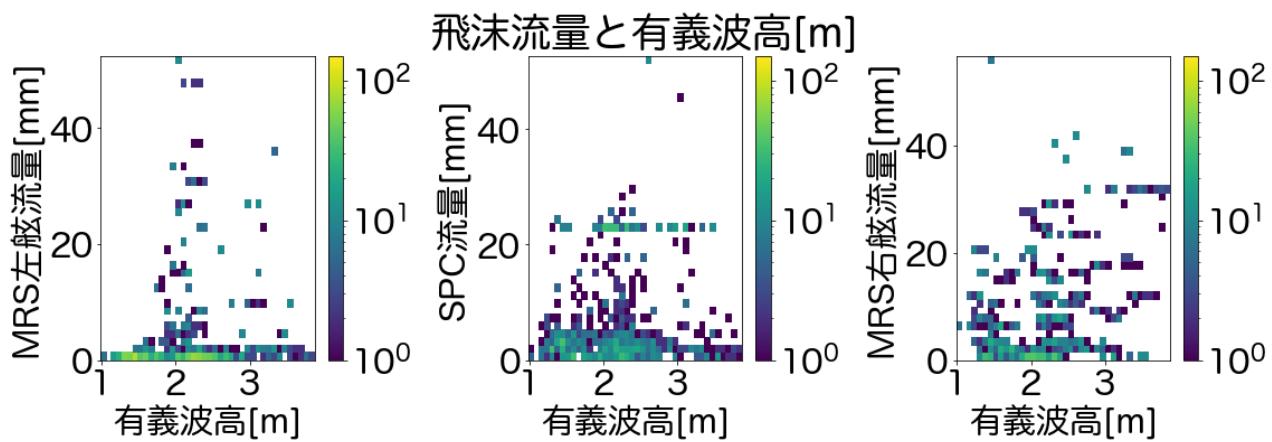


図 37 飛沫量と有義波高 2 次元ヒストグラム

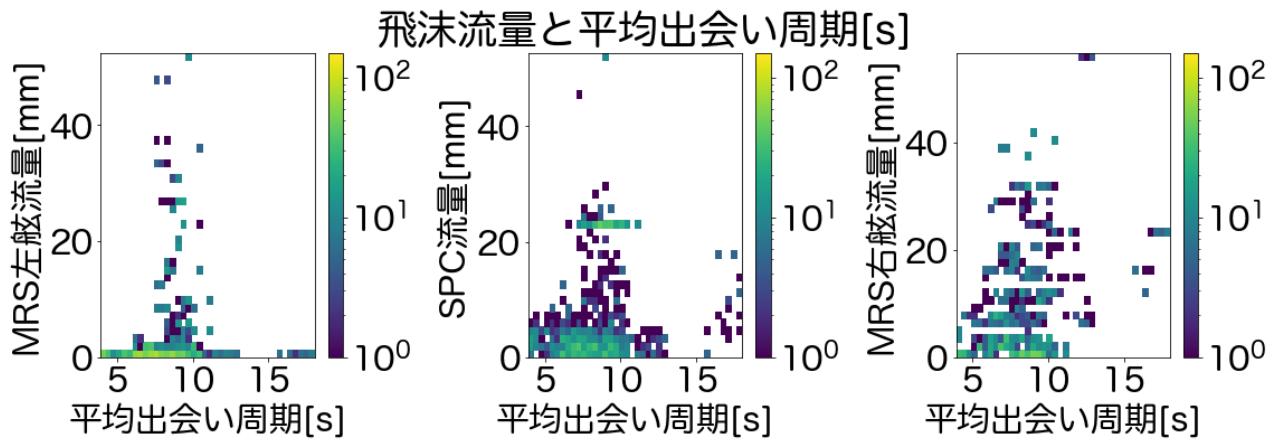


図 38 飞沫量と出会い周期 2 次元ヒストグラム

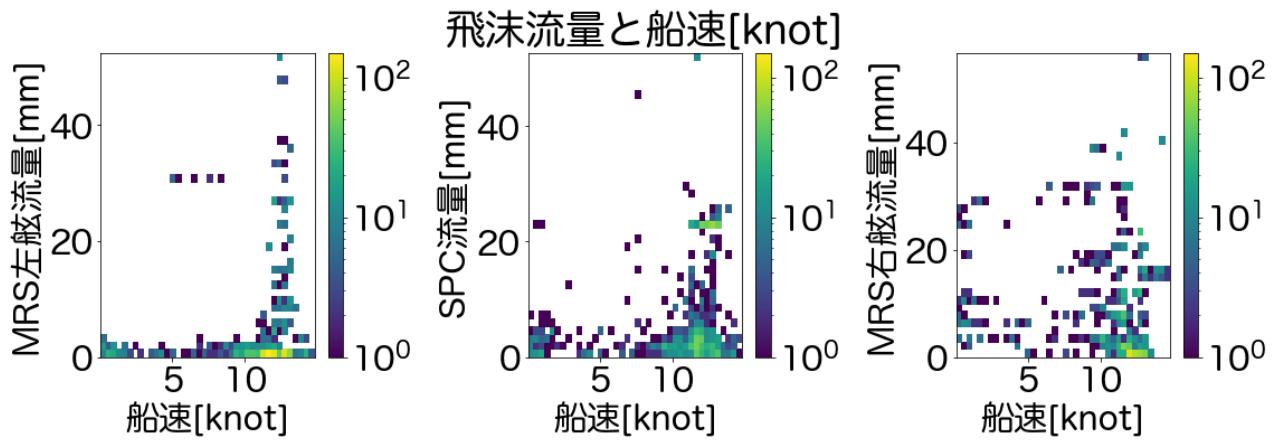


図 39 飞沫量と船速 2 次元ヒストグラム

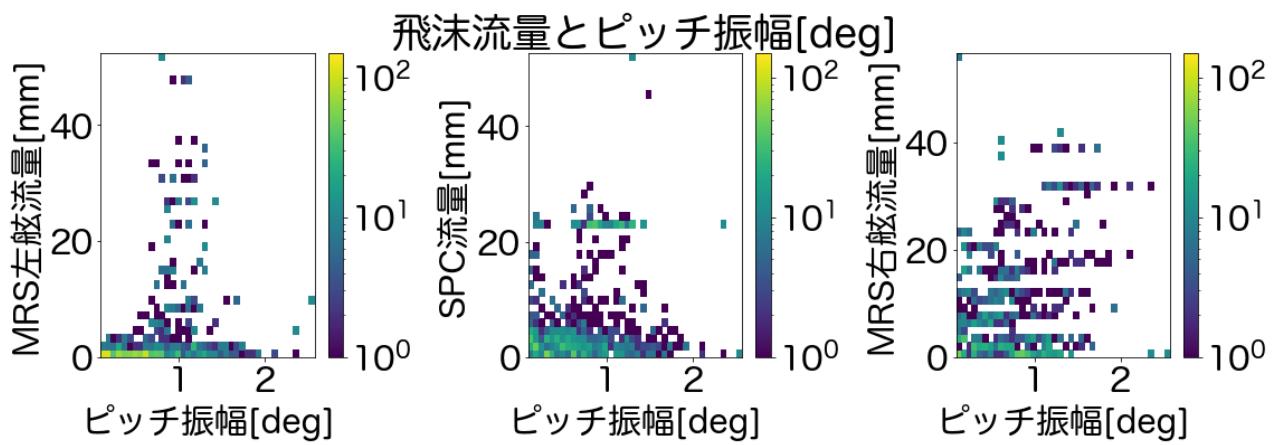


図 40 飛沫量とピッチ振幅 2 次元ヒストグラム

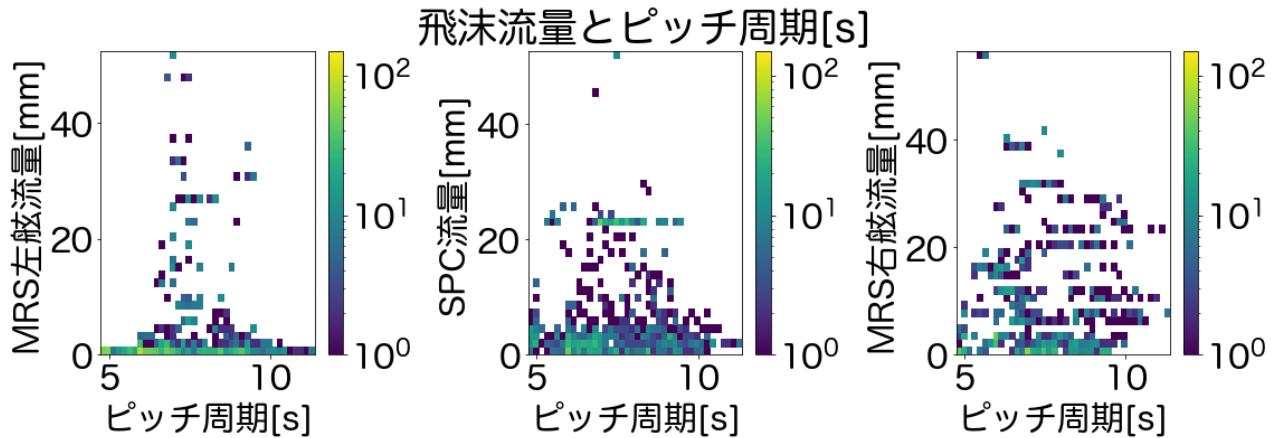


図 41 飞沫量とピッチ周期 2 次元ヒストグラム

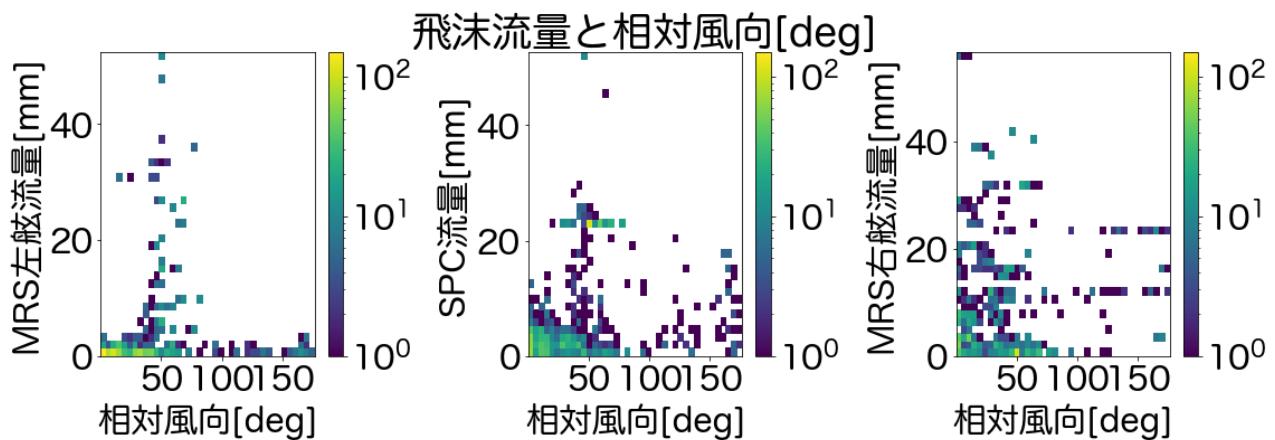


図 42 飞沫量と相対風向 2 次元ヒストグラム

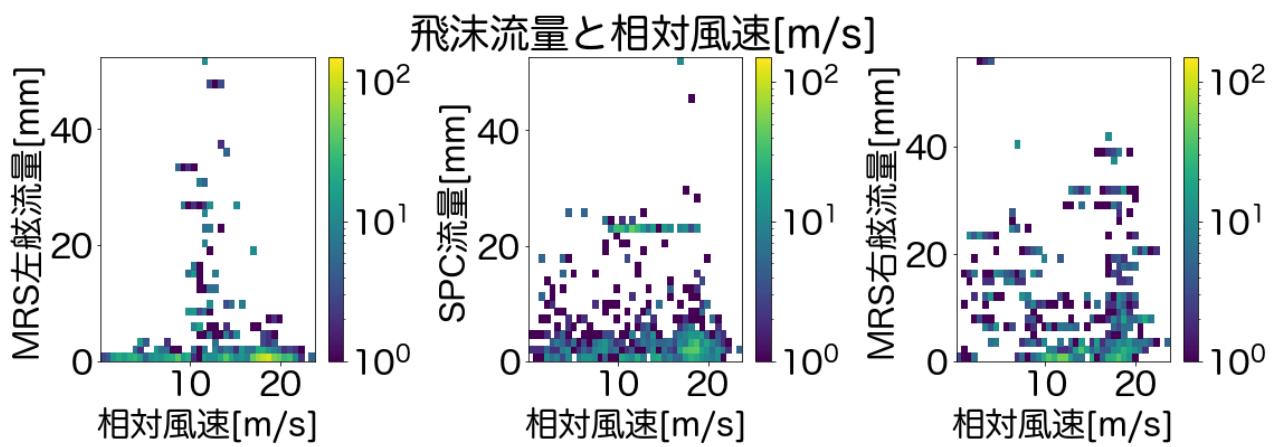


図 43 飛沫量と相対風速 2 次元ヒストグラム

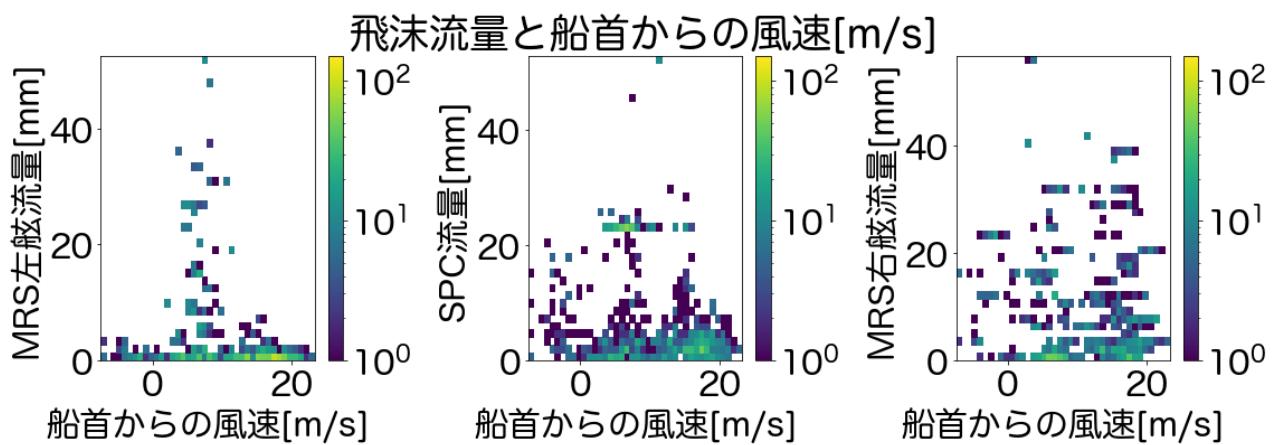


図 44 飛沫量と船首方向からの風速 2 次元ヒストグラム

### 5.3 考察

まず、図 35,36 から、解析対象データには船速に大きな偏りが見られることがわかる。また、平均出会い周期に関してもおおよそ 6-10 秒の間に偏っていることが見てとれる。相対風向はおおよそ 0-60 度程度に収まっていることもわかる。これらを踏まえた上で二次元ヒストグラムを見ていく。

第一に見受けられる傾向として、ある一定のピッチ周期・出会い周期の時に大きな流量の飛沫が観測されていることがわかる。平均出会い周期に関しては、おおよそ 8-10 秒程度に、ピッチ周期に対しては 7-8 秒程度において、大きな飛沫流量が集中していることが見て取れる。ここでピッチ揺れの固有周期との関連を見るため、3.2.4 に記載した「みらい」RAO を式 11,12,15 を用いて出会い周期に変換したもの図 45 に示す。

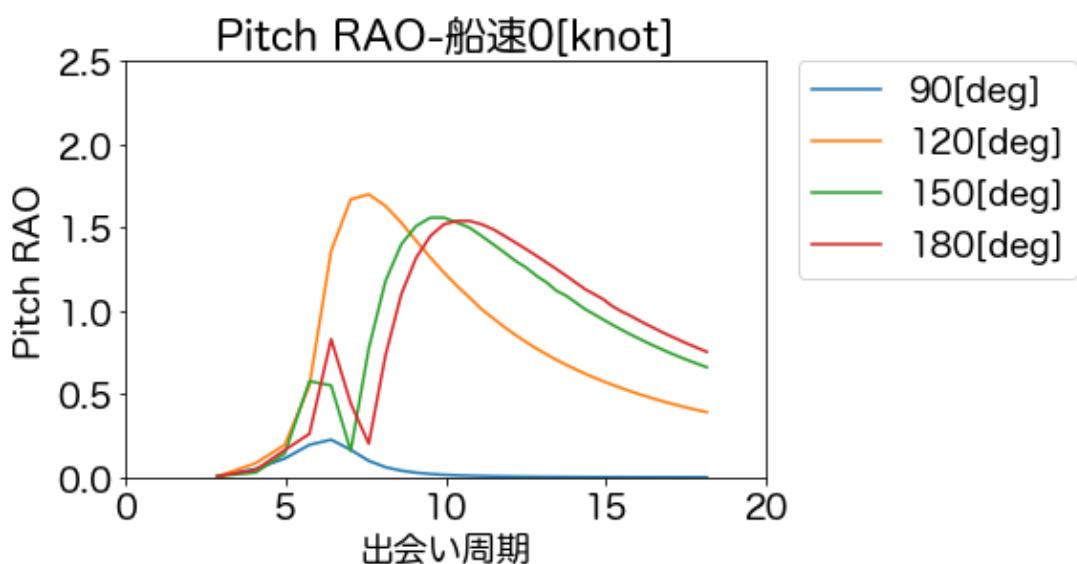


図 45 停船時の Pitch RAO

一般に「roll および pitch の造波減衰は大きくなないので、固有周波数近傍で動揺の RAO は高いピークを示す」ことが知られている [28]。したがって、停船時向かい波のピッチ揺れ RAO はおおよその固有周期と一致すると見做すことができる。

JAMSTEC から提供いただいた RAO の導出過程において、どのような積載量を仮定しているのかは本論文執筆時点で不明であるが、北極航海 2018 においては、長期間の航海に加え、海氷というハザードも存在するため、通常よりも余裕のある量の燃料や食料を積載しているものと考え

られる。したがって重心は RAO の計算時の仮定より下がっているものと想定される。固有周期は GM が大きくなるに伴い小さくなることが知られているため、8-10 秒程度で大規模な飛沫イベントが発生することは、固有周期に近いからであると見做すことができる。

ここで、固有周期においてなぜ飛沫量が大きくなるのかを考えてみる。一般に縦揺れ角と最大波傾斜の比は相対波向、船長波長比を一定に保てばほぼ縦揺れの固有周期のところに山が生じることが知られている（図 46[41]）。それゆえ、固有周期付近では海面と船体との間に強い力が生じ、飛沫が発生しやすいものと考えられる。

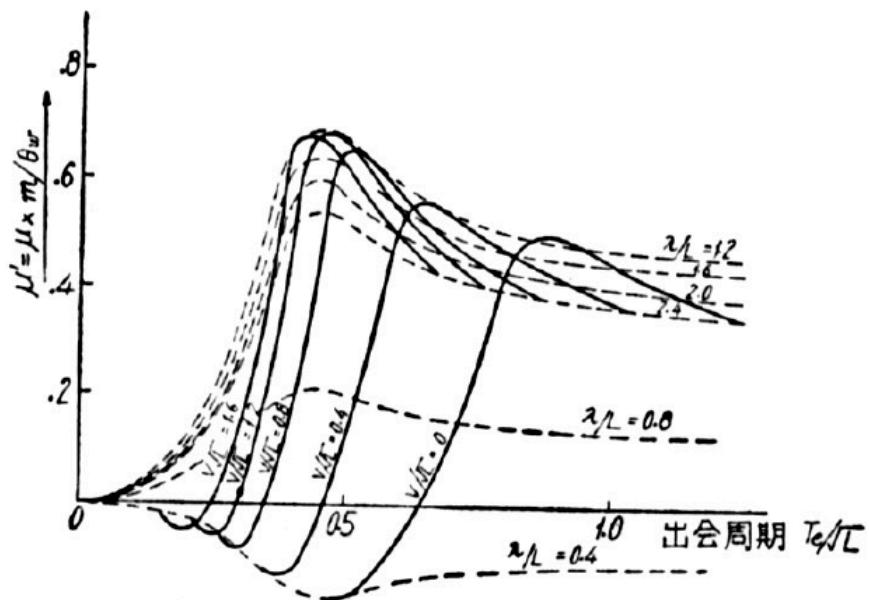


図 46 縦揺れ角と最大波傾斜の比と出会い周期の関係 [41]

固有周期は相対波向が、重要なパラメータであるが、「みらい」において観測されたデータには波向が含まれないため、どちらから波を受けたか考慮することができない。

また、同じく図 46 からわかるように、船長波長比率に応じて、縦揺れ角と最大波傾斜の比の値が大きく変化していることが見て取れる。したがって船長波長比も重要なパラメータとなることが予測される。これらの波向、船長波長比に関しては、後の章で ERA5 の波浪データと組み合わせて考察することとする。

次に見受けられる傾向として、特に左舷 MRS に関して、有義波高およそ 2m という閾値が見られることである。しかしながら、波高が大きいからといって必ずしも飛沫が起こっているとは限らない。これは先に述べた出会い周期が大きく影響しているものと考えられる。

また、相対風向が 50 度程度の時もしくは船首方向からの風速が大きい時に飛沫が検出されてい

る傾向があることが見て取れる。これから船首ショルダーで発生した飛沫が斜めから吹き込む風で巻き上がりセンサーに到達していると考えられる。しかしながら、先に述べたように、風向に関しては偏りが大きく明確な特徴であるとは言い難い。

## 5.4 まとめ

解析対象データには船速・相対風向などに偏りが見られるが下記のような傾向が見られる。

- 出会い周期・ピッチ周期が固有周期におよそ一致する時に飛沫が検出されやすい
- 特に左舷 MRS に対してピッチ振幅・有義波高に飛沫発生の閾値が見られる
- 相対風向が 50 度程度の時に飛沫がセンサーに到達しやすい
- 船首方向からの風速が早いほど飛沫が検出されやすい

また、飛沫発生条件においては、波長、相対波向、波周期などが重要なパラメータであるが、「みらい」ではこれらの値は取得できない。したがって再解析データなどから波浪条件を取得して考察する必要がある。

## 6 ERA5 からの海水飛沫予測

前章において、出会い周期が船舶の固有周期とがおおよそ一致するとき飛沫が発生しやすい傾向があること、が示唆された。しかしながら、「みらい」で観測されたデータでは、流向・波長といった海象データを考察することが困難である。

本章においては、まず、3.3 で説明した ERA5 データセットより取得した海象データと「みらい」の船速・船向を組み合わせることにより、飛沫発生時の海象の傾向をみることを目的とする。

また、ERA5 データセットの気象・海象データから解析データ内の飛沫発生を予測できないかを探すこととする。なお、ERA5 データセットは解析データの時空間情報を用いて近傍値取得により結合している。

### 6.1 波浪と飛沫量の2次元ヒストグラム

まず、第 5 章で見ることのできなかった波浪データとの関連を見てみる。図??-51 に飛沫量と ERA5 から取得・計算した出会い周期・相対船向・波長・波形勾配との関連を見るための 2 次元ヒストグラムを示す。

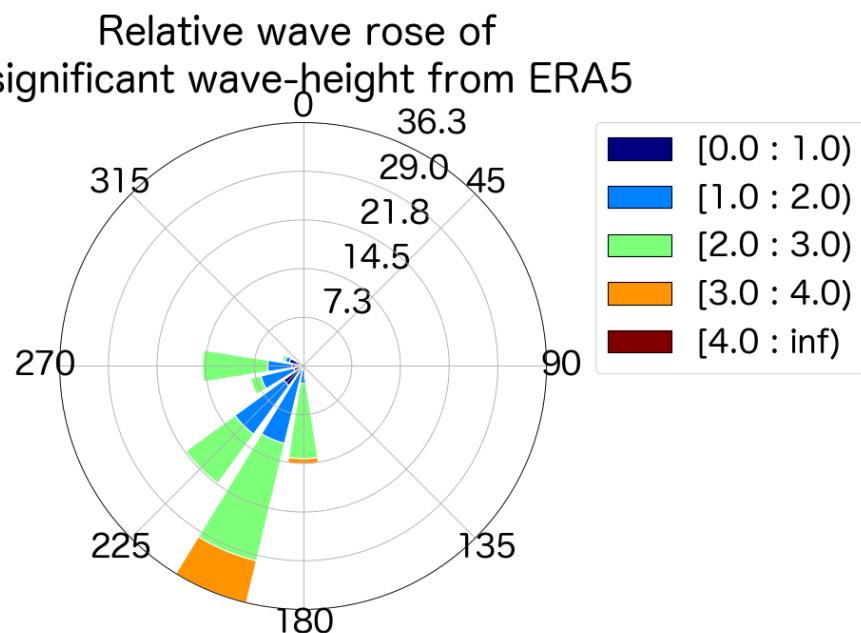


図 47 ERA5 から得られる有義波高分布ローズ

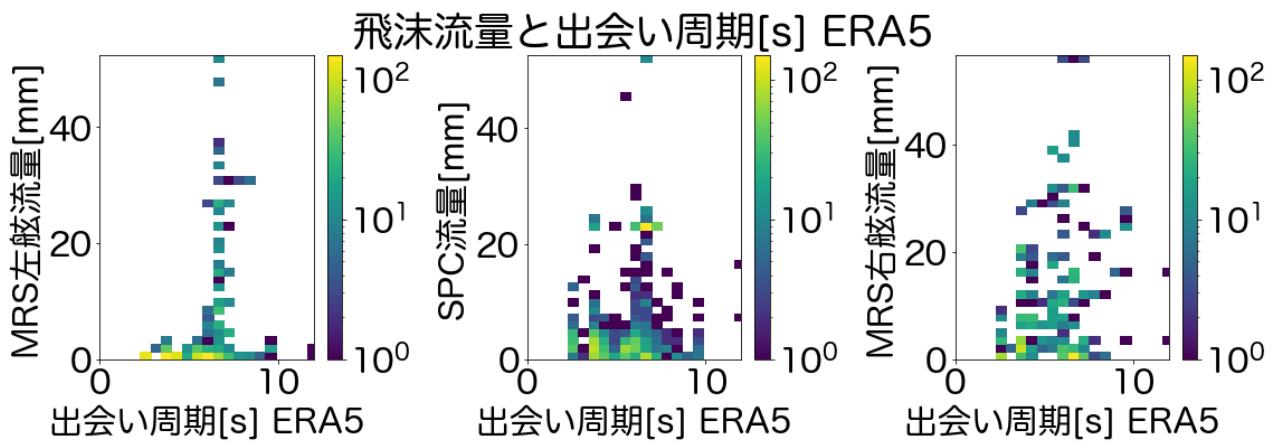


図 48 飛沫量と ERA5 より取得した出会い周期の 2 次元ヒストグラム: 固有周期付近拡大図

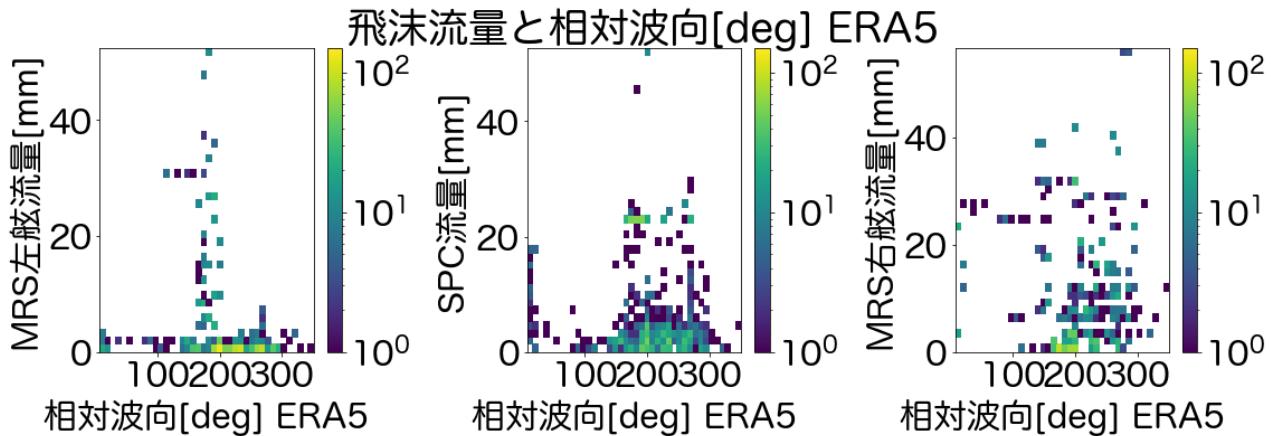


図 49 飞沫量と相対波向の 2 次元ヒストグラム

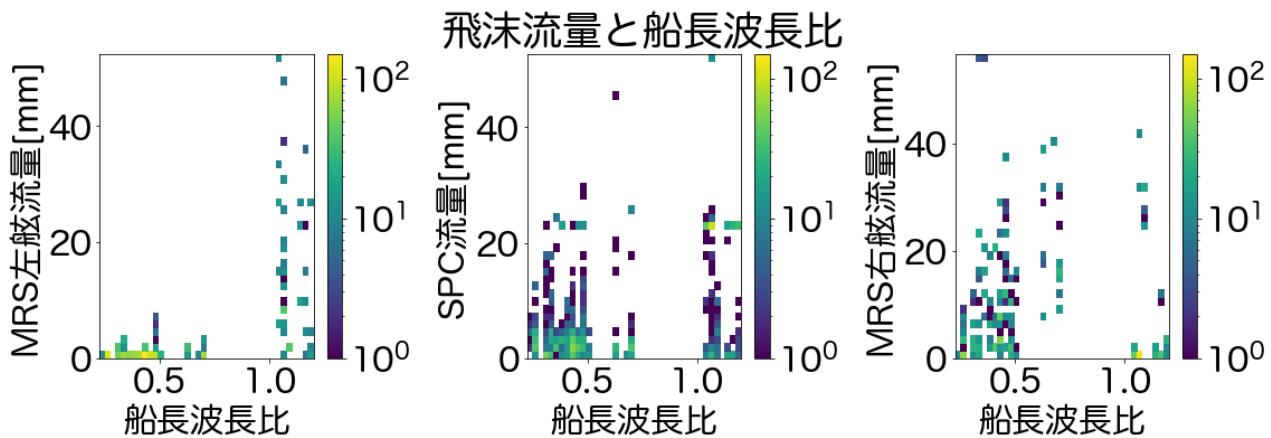


図 50 飞沫量と船長波長比の 2 次元ヒストグラム

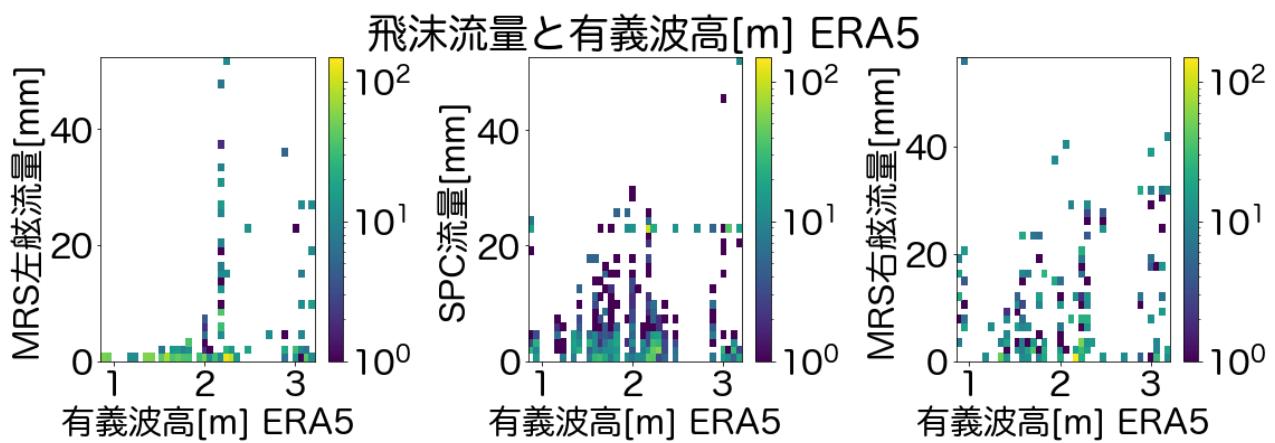


図 51 飛沫量と有義波高の 2 次元ヒストグラム

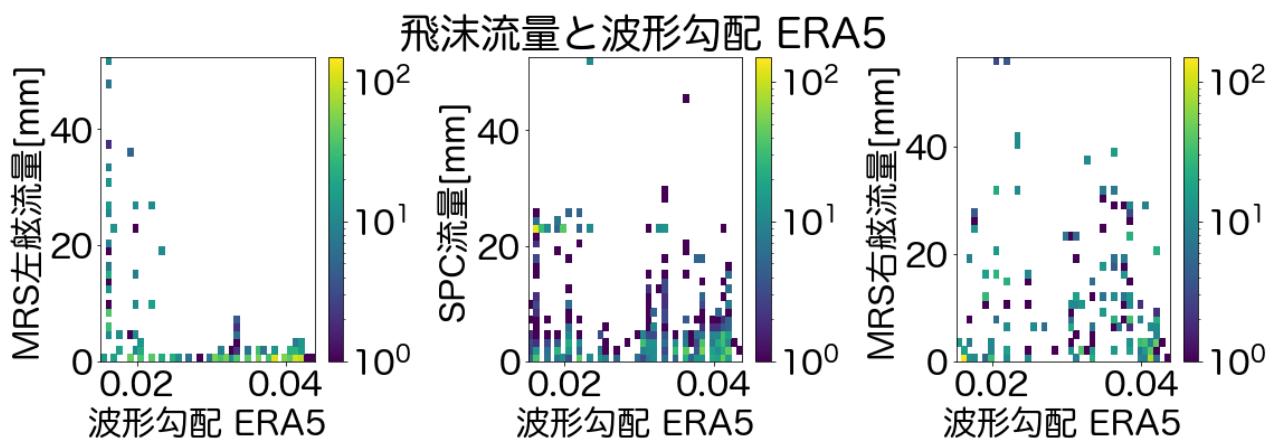


図 52 飛沫量と波形勾配の 2 次元ヒストグラム

これらの図に対し順番に考察していく。まず、図 48 の出会い周期に関して、おおよそ 6-7 秒程度にピークが見られることがわかる。これは、図 38 で見た出会い周期よりやや小さい。そこで、「みらい」で観測した出会い周期と ERA5 の観測値を図 53 のように比較してみる。

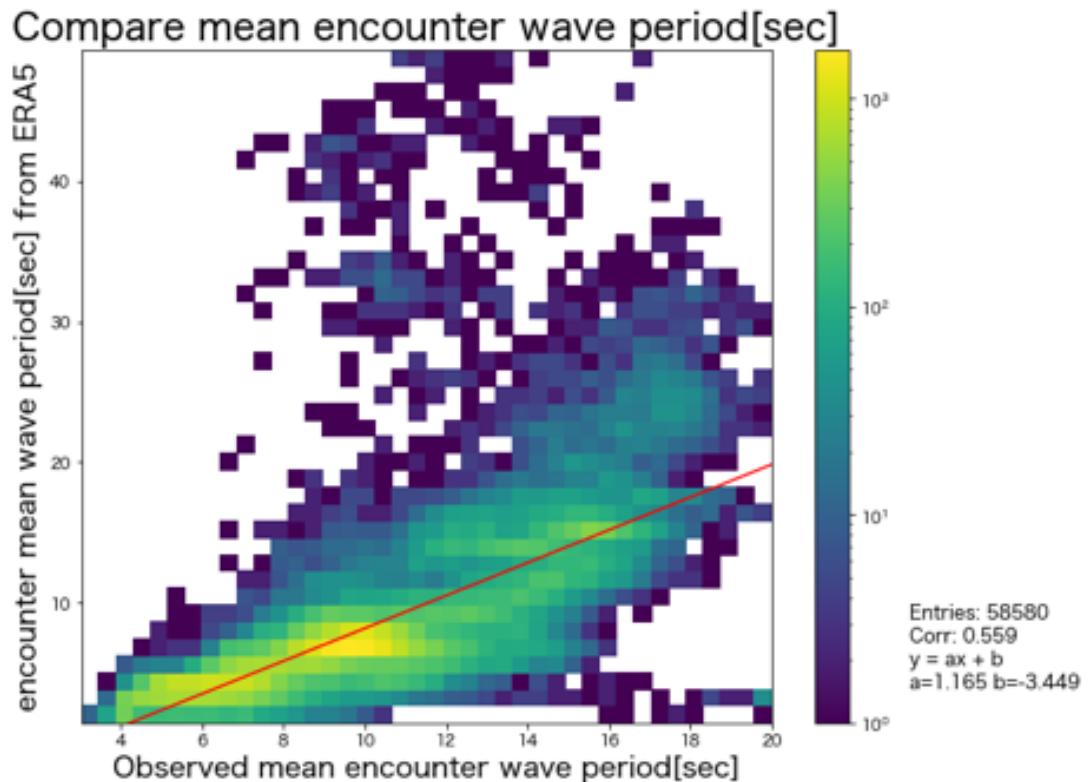


図 53 「みらい」で観測された出会い周期と ERA5 より推測した出会い周期

一部観測値から大きく外れている部分もあるため相関係数こそ小さいものの、概ね ERA5 による出会い周期の推定値は観測値より小さめに出る傾向があることが見て取れる。この回帰直線から、ERA5 における出会い周期 6-7 秒は「みらい」で観測された出会い周期 8-9 秒に匹敵することがわかる。したがって、このように「みらい」で観測された出会い周期と ERA5 から推測した出会い周期に対し補正をかけることにより、図 38 で得られた、飛沫量が大きいとき固有周期とおおよそ傾向があることがこの結果からも同様に言えることがわかる。

図 49 の相対波向と飛沫量の関係をみると、180 度つまり、ほぼ正面から受けている場合に飛沫が起きやすいことがわかる。

また、船長波長比と飛沫量との関係を示す、図 50 を見てみると、左舷 MRS においては大きな波長において飛沫が観測されている傾向があることが見て取れる。一方 SPC においては、様々な波長で飛沫が観測されているという違いがある。これは、船長波長比率が大きい時に強制モーメ

ント係数が大きくなること [41] が知られている。

以上から、相対船向・波長・有義波高に関して飛沫に対して大きく関連があるということが明確に見て取れる。

## 6.2 気象予報データと飛沫量の関係

第 5 章にて相対風向および、船首方向からの風速に関して、飛沫検出の関連があることが示唆された。そこで、図 54 に ERA5 の気象データから得られるこの 2 つのパラメータに対して飛沫量の関連を示す。

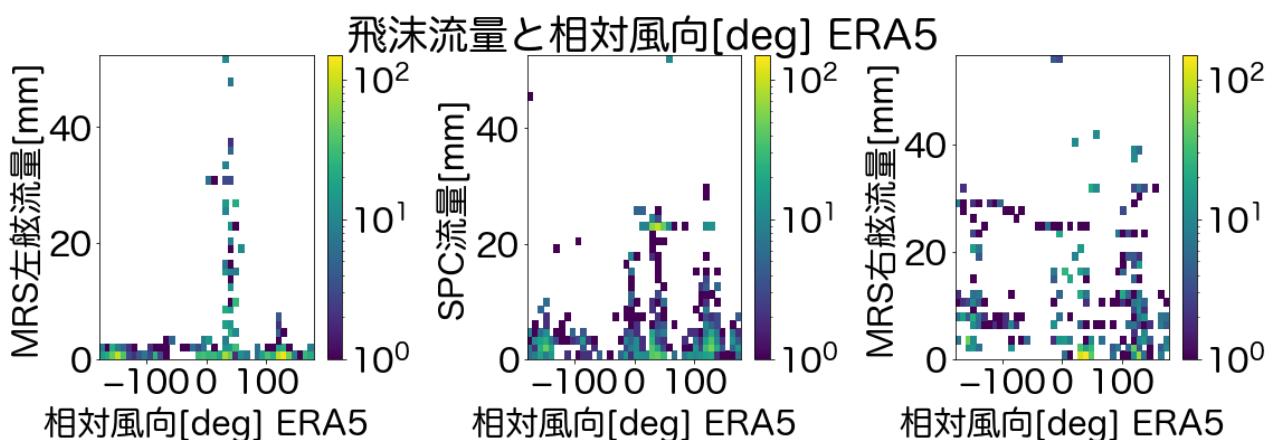


図 54 飛沫量と ERA5 から求めた相対風向の 2 次元ヒストグラム

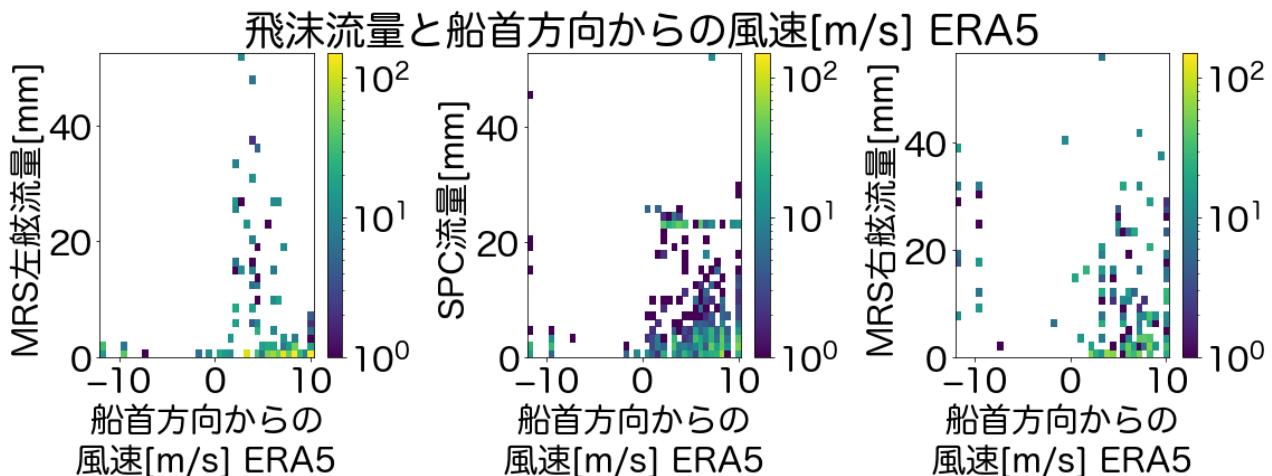


図 55 飞沫量と ERA5 から求めた船首方向からの風速の 2 次元ヒストグラム

図 54 の相対風向に関して、概ね船首方向から受けている場合に飛沫が検出されていることが

見て取れる。また、図 55 に関して、特に左舷 MRS に関して、船首方向からの風速が正の場合に飛沫が検出されている傾向が見て取れる。これらは第 5 章で確認された傾向と一致しており、ERA5 データから、大規模な飛沫の発生しやすい海域を事前に予測できる可能性を示唆している。

### 6.3 まとめ

本章においては、ERA5 データセットから大規模な海水飛沫が発生しやすい条件を抽出するために、様々なパラメータと飛沫量との関連を解析した。その結果から以下のようなことが言える。

- ERA5 の有義波高がおよそ 2m 以上の海域において飛沫が発生しやすい
- 向かい波の時に飛沫が発生しやすい
- 平均周期から計算される波長が長い方が飛沫が発生しやすい
- ERA5 から推測した出会い周期と「みらい」で観測された出会い周期にはある程度の相関が認められる
- 上記の回帰直線により補正した飛沫の発生しやすい出会い周期は固有周期とおおよそ一致する
- 船首方向から風を受けているときに飛沫が到達しやすい

また、上記の条件のうち、相対波向、出会い周期、相対風向に関しては船速・船向を調整することにより、ある程度の調整は可能である。したがって、着氷指標 PR が大きくなり、波長が長く、有義波高がおよそ 2m に達する海域においては、この 3 つのパラメータに注意しながら航行することにより大きく海水飛沫を低減させることができると考えられる。

## 7 飛沫観測試験航行

第5章および第6章においては、取得したデータ全体を統一的に取り扱い、飛沫の発生しやすい条件の検討を行った。本章においては、特定の短い期間のデータ、具体的には北極航海2018において実施された飛沫観測試験航行を解析することにより、これまで見てきた、船首方向を調整することによって飛沫を抑えられる可能性について検討する。

### 7.1 実施条件

#### 7.1.1 実施計画

本試験は風向きを基準として船首方向を調整し、特に異なる相対風向に対する飛沫量の変化を確認することを目的としている。具体的には図56に示す実施計画概要のように、角度を変えた2種類の六角形を記述するイメージで航跡を調整し、様々な風向でのデータを取得することを目的としている。また、船速は許容される最大船速で、試験中は極力一定で行い、各辺ごとに10分間航行するものとした。

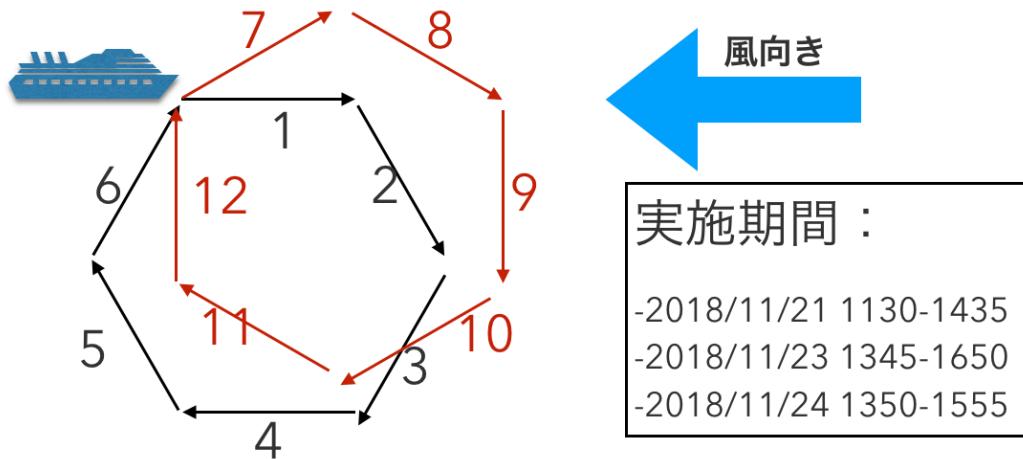


図56 飛沫試験航行の初期計画概要

### 7.1.2 実施時の状況

表 17 に実施時に調整したパラメータおよび、筆者の記録上の天候、飛沫量を示す。

第一回試験においては、相対風向を基準として船首方向を調整した。また、この時には雪が大量に降っていた。そのため、特に SPC の出力値に雪が大きく影響していることには注意を要する。なお、第一回の試験においては、SPC を途中まで正常に作動させていなかったため、欠損値が存在する。

第二回試験においては、真風向と船首方向の成す角度を基準として船首方向を調整した。これは、第一回試験において、相対風向を基準とした場合、追い風の時、角度のブレが非常に大きく、調整が困難になったためである。また、この試験の時にはわずかに雪が降っていた。飛沫量は非常に大きく、第一回に比べ理想的な条件であると言える。

第三回試験においては、過去二回の試験に比べ、穏やかな解消であった。そのため、海水飛沫が起りにくく予想されたため、過去二回において大規模な海水飛沫が目視において確認されやすかった向かい風の時の船首方向のみのデータを取得した。その代わり、細かく船首方向を調整して行なった。したがって、航跡はこれまでの試験とは異なる。

なお、試験航海実施中は夜であり、画像記録を残すことは極めて困難であった。

表 17 実施時の状況

	開始時間	調整パラメータ	天候	飛沫量
第一回	2018 年 11 月 21 日 11:30	相対風向	雪	小
第二回	2018 年 11 月 23 日 13:45	真風向と船首方向の成す角度	小雪	大
第三回	2018 年 11 月 24 日 13:50	真風向と船首方向の成す角度	快晴	微

次に、表 18 に試験航海実施日に「みらい」で観測されたおよび、ERA5 で取得した風・波に関するパラメータの平均値を示す。

特筆すべき点として、11/24 の有義波高の値が ERA5 推定値と「みらい」観測値が大きく異なっていることである。

原因は厳密には不明であるが、乗組員や観測技術員の方々によると、マイクロ波式波高計は追い波の時実際より小さいと思われる値を、向かい波の時実際より大きいと思われる値を出力する傾向が指摘されている。筆者の主観ではあるが、この傾向は正しく、少なくとも今回の飛沫試験

中の有義波高に関しては、ERA5の方が妥当であると考えている。しかしながら、この点に関しては、マイクロ波式波高計およびERA5データセットの精度に関する問題となり、本研究の本筋と大きく離れるため、今後の検討事項とする。

なお、以降の解析においては、相対風向は「みらい」で観測されたものを、相対波向はERA5と船首方向を組み合わせて計算したものを利用している。

表 18 各試験航海実施時の風・波の平均値

	2018/11/21	2018/11/23	2018/11/24
ERA5：有義波高 [m]	3.18	3.42	2.82
「みらい」：有義波高 [m]	2.89	3.88	5.50
ERA5：平均波向 [deg]	55.78	30.00	29.01
ERA5：真風速 [m/s]	12.37	12.88	10.99
「みらい」：真風速 [m/s]	14.62	17.49	11.48
ERA5：真風向 [deg]	24.86	44.64	44.27
「みらい」：真風向 [deg]	64.87	39.78	46.22
「みらい」：船速 [knot]	11.32	10.47	10.92

## 7.2 結果

以降に各試験ごとの結果を示していく。それぞれの試験において、各辺ごとのパラメータの平均値を表の形で記載した後、航跡・レーダーチャートの順に掲載する。なお、表の一番左に記載した時刻は各辺の開始時間を表している。また、航跡の色は対数表記した飛沫量を表し、レーダーチャートの動径は飛沫量（対数ではない）、偏角は図ごとに船首方向・相対風速・相対波向を表している。レーダーチャート内部に記載されている数字は、観測された飛沫量の最大値の1/2の値を表している。すなわち、レーダーチャート外周の値は内部に記載された値の2倍となる。

### 7.2.1 第一回飛沫試験航行

表 19 第一回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ

start	相対風向 [deg]	相対波向 [deg]	SPC[mm]	MRS 右舷 [mm]	MRS 左舷 [mm]
2018/11/21 11:37	-2.12	171.12		2.24	2.73
2018/11/21 11:52	-55.13	98.76		1.97	2.64
2018/11/21 12:09	-121.34	25.06		3.81	5.12
2018/11/21 12:23	170.78	340.06		0.00	0.00
2018/11/21 12:37	118.58	307.47		0.00	0.00
2018/11/21 12:50	43.52	232.43		1.51	1.41
2018/11/21 13:02	33.96	219.26		2.10	2.60
2018/11/21 13:15	-25.61	137.13		2.69	1.75
2018/11/21 13:30	-76.22	74.73		4.19	2.10
2018/11/21 13:45	-153.60	355.70	12.76	0.00	0.00
2018/11/21 13:58	143.93	327.24	12.18	0.00	0.00
2018/11/21 14:10	84.30	276.95	13.96	0.00	0.00
2018/11/21 14:24	0.24	174.01	30.43	0.00	0.00

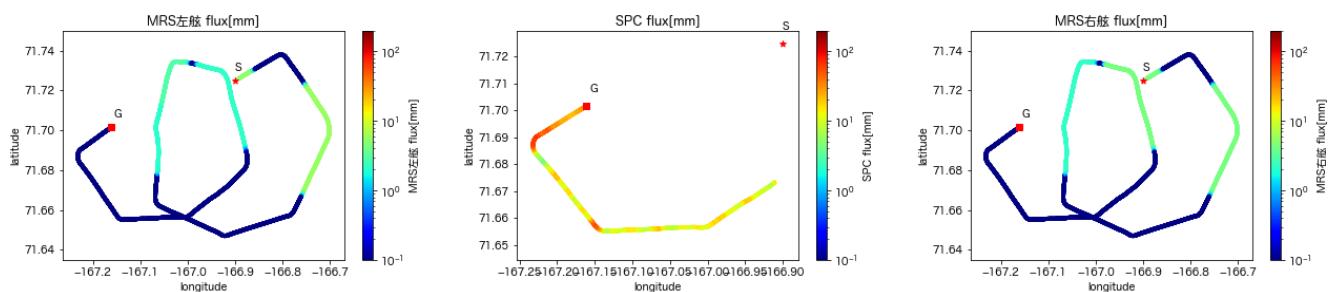


図 57 第一回飛沫試験：航跡

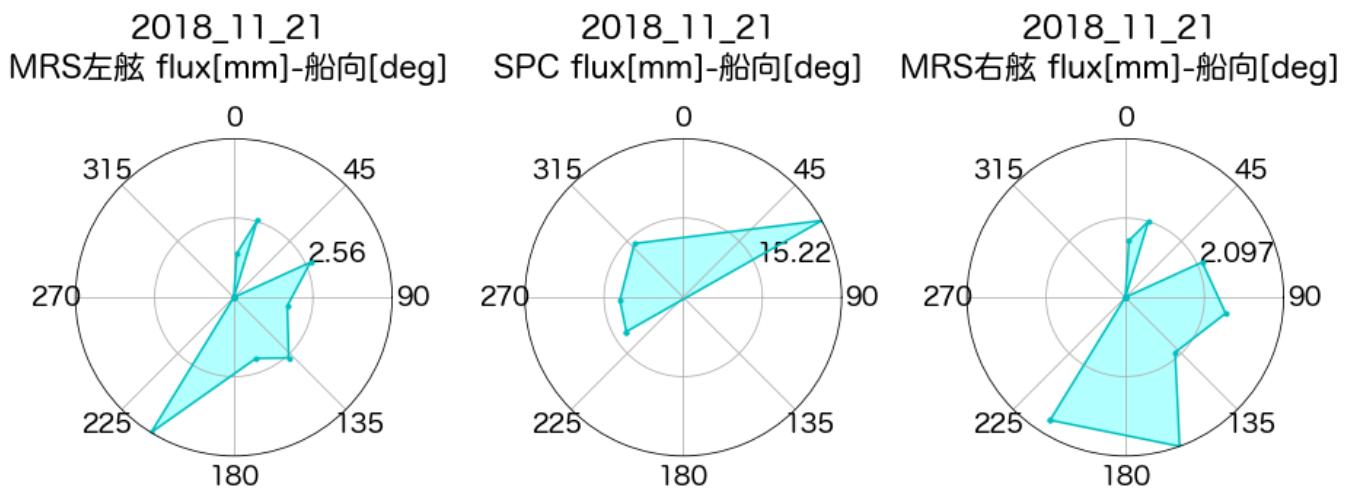


図 58 第一回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化

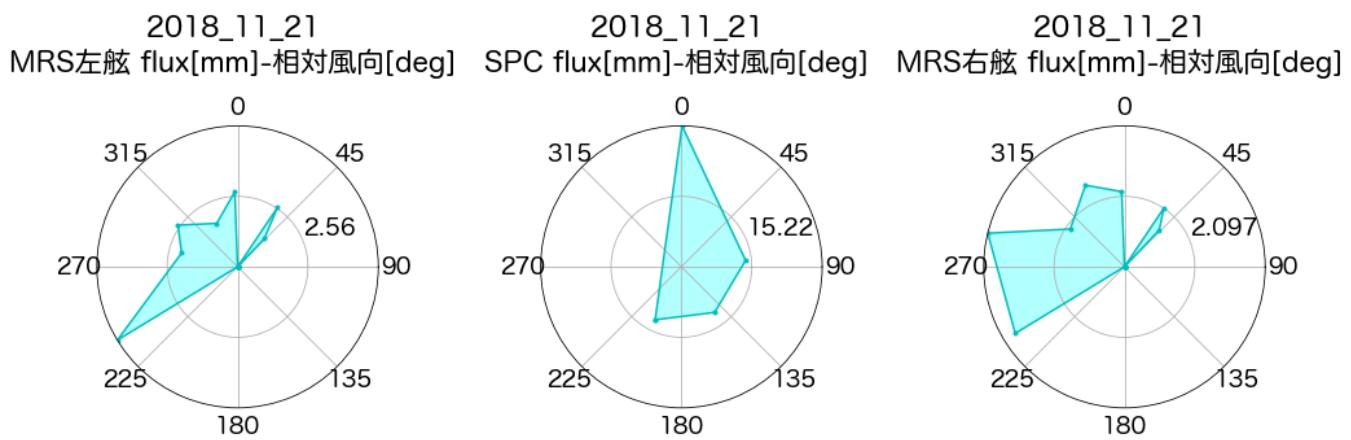


図 59 第一回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化



図 60 第一回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化

## 7.2.2 第二回飛沫試験航行

表 20 第二回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ

start	相対風向 [deg]	相対波向 [deg]	SPC[mm]	MRS 右舷 [mm]	MRS 左舷 [mm]
2018/11/23 13:48	-6.98	151.92	10.35	0.00	0.00
2018/11/23 14:02	-55.88	93.64	7.81	2.87	0.04
2018/11/23 14:16	-109.04	37.57	1.66	4.45	2.26
2018/11/23 14:29	160.18	336.31	4.71	0.00	0.00
2018/11/23 14:43	88.54	273.65	2.88	0.00	0.00
2018/11/23 14:55	33.34	214.24	11.23	0.00	0.00
2018/11/23 15:08	12.07	182.48	6.54	4.71	1.37
2018/11/23 15:20	-33.45	122.28	14.88	1.00	0.07
2018/11/23 15:34	-86.20	69.49	1.29	4.65	3.16
2018/11/23 15:48	-153.79	6.41	6.77	0.35	0.09
2018/11/23 15:59	105.77	302.70	8.78	0.00	0.00
2018/11/23 16:11	58.35	242.93	3.30	0.55	0.77
2018/11/23 16:24	38.86	214.53	9.87	0.00	0.00

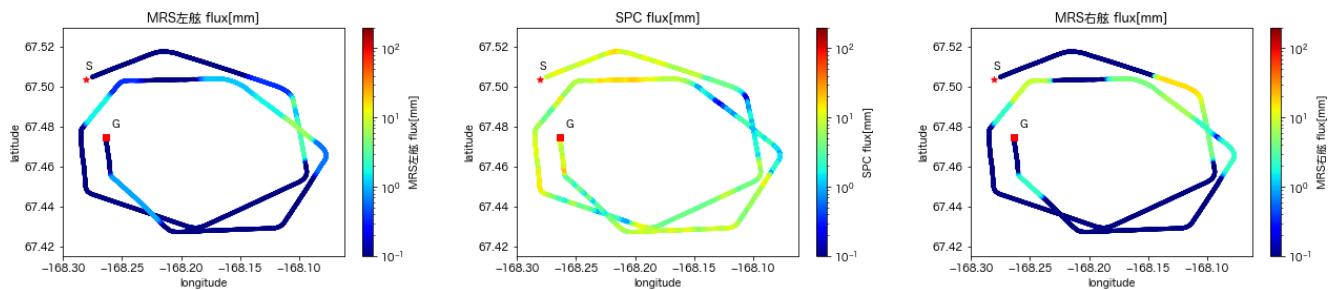


図 61 第二回飛沫試験航跡

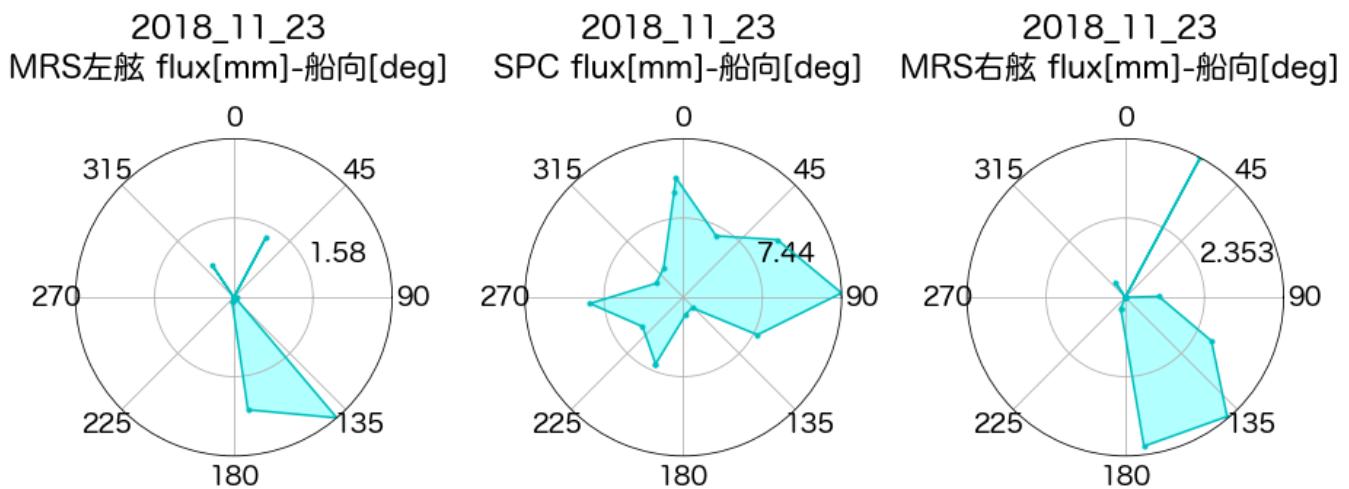


図 62 第二回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化



図 63 第二回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化

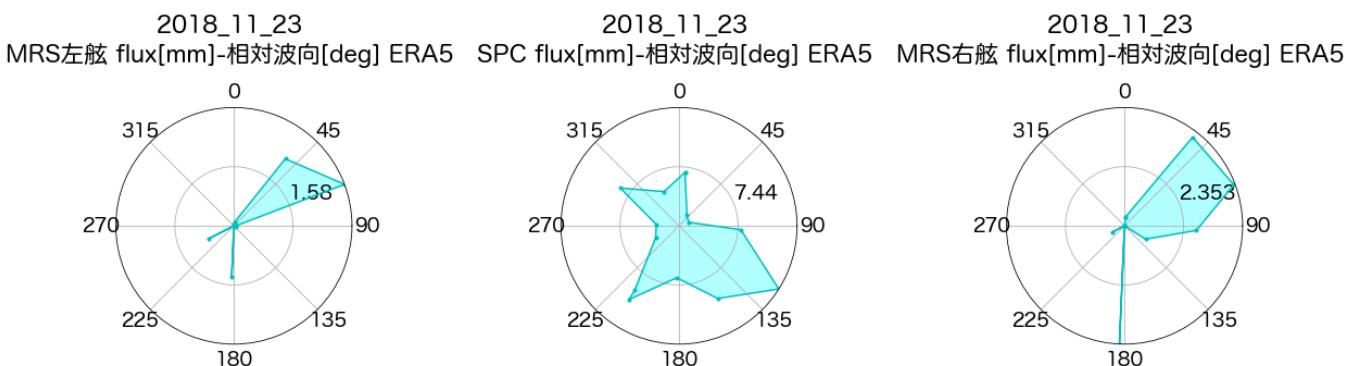


図 64 第二回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化

### 7.2.3 第三回飛沫試験航行

表 21 第三回飛沫試験の各辺ごとのパラメータ

start	相対風向 [deg]	相対波向 [deg]	SPC[mm]	MRS 右舷 [mm]	MRS 左舷 [mm]
2018/11/24 13:56	-43.12	100.92	9.91	0.00	0.00
2018/11/24 14:08	-23.70	123.19	23.09	0.00	0.00
2018/11/24 14:19	-21.24	132.15	23.59	0.00	0.00
2018/11/24 14:31	-8.30	149.84	25.93	0.00	0.00
2018/11/24 14:42	-1.21	158.45	22.08	0.00	0.00
2018/11/24 14:54	2.63	166.96	17.14	0.00	0.00
2018/11/24 15:05	13.77	182.89	10.69	3.65	0.18
2018/11/24 15:17	44.54	213.12	2.20	4.98	0.25
2018/11/24 15:28	60.91	225.34	12.53	0.00	0.00
2018/11/24 15:42	-156.64	354.82	7.85	0.00	0.00

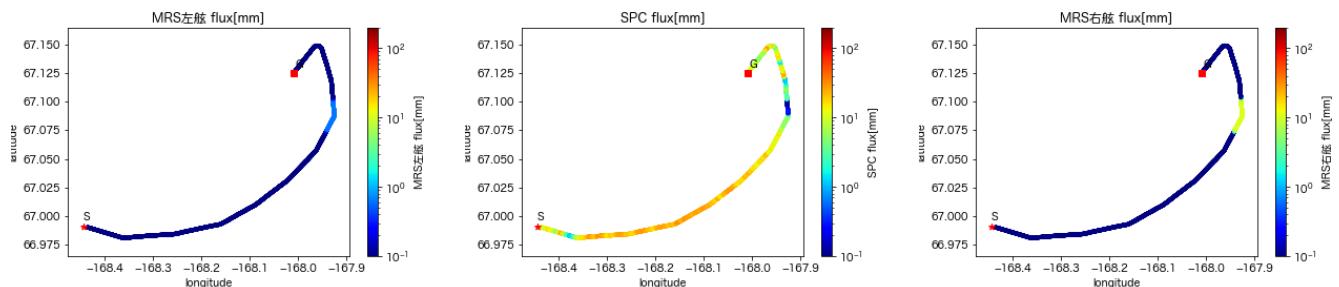


図 65 第三回飛沫試験:航跡

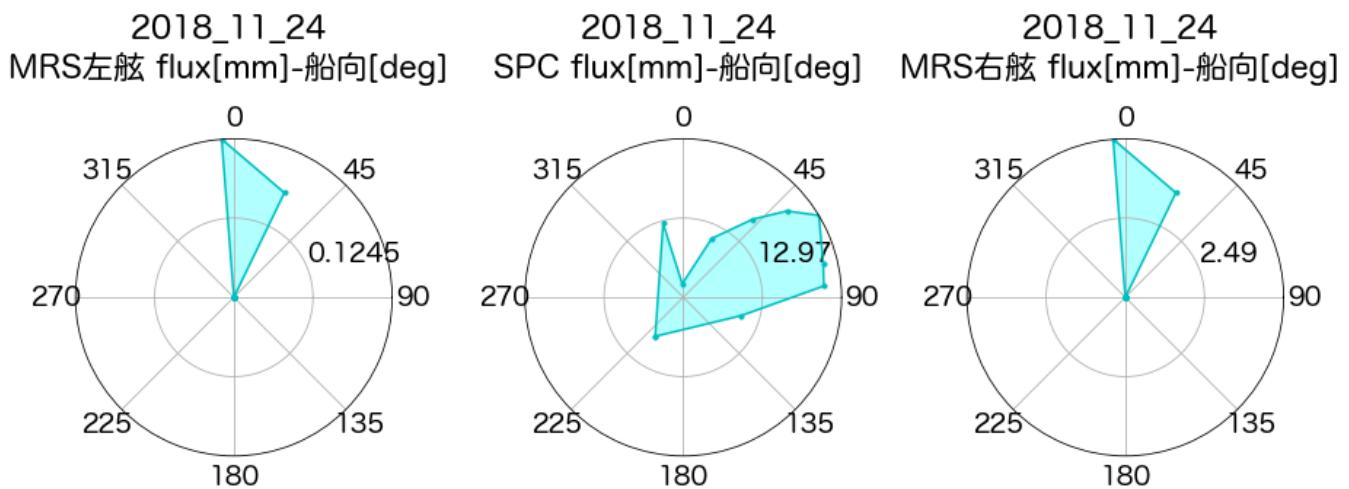


図 66 第三回飛沫試験：船首方向による飛沫量の変化



図 67 第三回飛沫試験：相対風向による飛沫量の変化

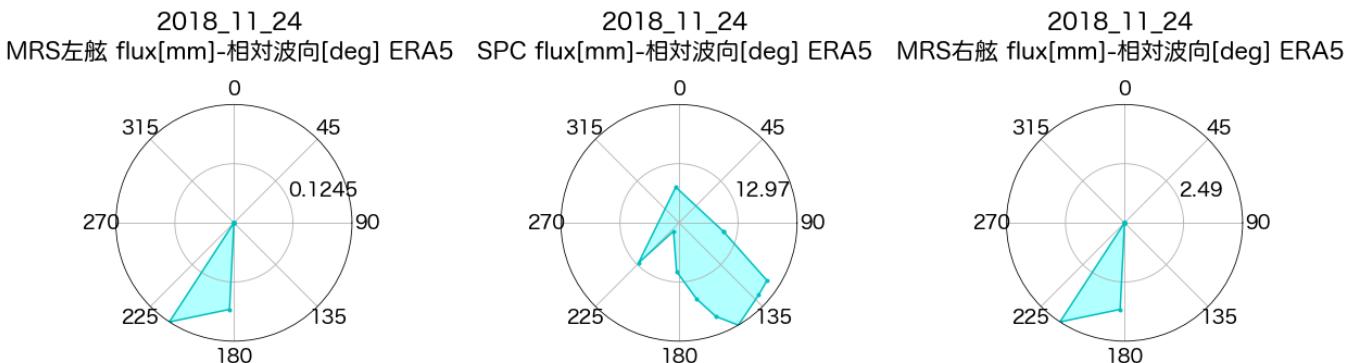


図 68 第三回飛沫試験：相対波向による飛沫量の変化

### 7.3 考察と今後の課題

全ての試験航海において、船首方向により飛沫量が大きく変わる傾向が見て取れる。したがって、飛沫回避において、船首方向の調整は有効であると考えられる。

SPCにおいては向かい波で船首側から風を受けるときに飛沫量が大きくなる傾向があるが、MRSに関してはその限りではないことが見て取れる。また、似たような風向・波向においても、飛沫量が大きく異なっていることが見て取れる。

これは、波浪条件がわずかに変化することで飛沫発生量が大きく変化することを示しているものと考えられる。また、平均周期や平均波向などを用いていることも影響している可能性がある。不規則波浪は複数の周波数・波向の波が重なり合って形成されている。これらを適切に扱うためには、周波数-方向スペクトルを用いた解析が必要である。このデータは ERA5 MARS type database より 1 時間ごとの再解析・予測データを取得可能であるが、データ容量が大きく取得に多大な時間を要するため今後の課題とする。

## 8 結論

### 8.1 まとめ

本研究においては、着氷の発生条件の解明を目指し、着氷の要因の一つである飛沫が発生する条件、およびそれを用いた飛沫発生の予測、回避に関する研究を行なった。

まず第4章において、MRS、SPCの風速に対する特性を調査した。その結果、風速が強くなるとMRSの捕縛率が小さくなる傾向が見られた。実海域における観測では様々な粒径の飛沫が揺れ動くセンサーに対し飛来するため、一律の補正は困難であるが、この傾向に注意した上で解析を行う必要がある。

次に第5章においては、「みらい」で観測された様々なデータと飛沫量の関連を調べた。その結果、出会い周期が固有周期によよそ一致する時に飛沫が検出されやすいこと、ピッチ振幅・有義波高に飛沫発生の閾値が見受けられること、相対風が船首側から特に50度程度の時に飛沫がセンサーに到達しやすいうこと、船首方向からの風速が早いほど飛沫が検出されやすいことなどが明らかとなった。

そして第6章においては、ERA5の種々のデータと船速・船向を組み合わせることにより、相対波高・波長・有義波高に明確な関連性があり、風速・風向に関しても概ね「みらい」における結果と合致する結果となった。すなわち、有義波高がおよそ2m以上であること、相対波向が180度であること、波長が長いことであること、出会い周期が固有周期に近いこと、船首側から風が吹いていることなどが飛沫が飛来しやすい条件であることがわかる。

以上の結果から「みらい」においてはERA5データセットと船速・船向を組み合わせることにより、ある程度大規模な海水飛沫を予測できると考えられる。

最後に第7章では、船首方向を調整することで実際に飛沫量が大きく変化することが明確に見て取れた。相対波向、出会い周期、相対風向などは船速・船向により調整可能なパラメータであり、これらの結果を用いることで飛沫の発生を抑えることを目的とした操船を検討していくことが可能であると考えられる。

## 8.2 今後の課題

本観測の大きな欠点として、明確に飛沫と降水を分別しきれないことが挙げられる。本研究においては ERA5 の total precipitation を用いることにより降水を除去しているが、局所的な降水が弾ききれないことや、降水のない区間まで除去している可能性が高い。大規模な海水飛沫が発生するような海域は、一般的に考えて降水が確認されることが多いと考えられる。

さらに、2.1.1 でも述べたように、海水飛沫は船首で発生したあと、風により移流拡散している。現在の観測方法では海水飛沫が発生してなおかつセンサーの方向に飛沫が風により移動しなければディテクトできない。つまり、船首で海水飛沫が発生したからといってセンサーでディテクト仕切れているとは限らない可能性がある。解析において発生した飛沫の分布が未知であることに、正確にわからない揺れ動く船体周りの風の挙動などによる飛沫の移流拡散が重なっているため、問題が非常に複雑なものとなってしまっている。

また、センサー出力値に細かい変動が見られるため飛沫が発生していない場合も、出力の値からは飛沫が発生したと見なされる場合もある。

以上様々な要因が重なり、センサーの検出データのみでは、船首で海水飛沫が起こる/起こらないの 2 値分類を適切に行なうことが極めて困難であった。本研究においては、少なくとも飛沫流量が大きくなった箇所においては大規模な海水飛沫イベントが発生している可能性が高いと仮定して、解析を行ってい傾向を抽出しているものの、より精密な解析を行っていくためには、この 2 値分類が必要不可欠である。

これらの対策として、これまでの研究成果から船首のスラミングが海水飛沫発生のおおよその原因であることが推測されるため、艦橋等に船首方向を録画し続けるカメラを設置することを提案する。この映像データと組み合わせることにより飛沫解析に使えるデータが飛躍的に増えるだろう。また、2 値分類も風による飛沫の移流拡散を無視して行なうことができるため、機械学習等への組み込みが容易になると考えられる。飛沫が発生した箇所のディテクトには画像分類等を応用することにより、作業時間の短縮が見込まれる。

また、なぜ有義波高の閾値が 2 m かなどに関しては物理的解釈が現状不十分である。この解釈のためには、実海域における不規則波中における物理的解釈より先に、試験水槽などの理想的環境で理論を組み上げていくことが重要であると考えている。理想的環境で組み上げてきた理論とこれまでの飛沫観測データと比較してみるとより考察が深まるものと考えられる。

## 謝辞

大学院生活2年半、本当に様々な人にお世話になりました。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。

まずは2年間半にわたりご指導くださった山口先生に深く感謝を申し上げます。ゼミでは私が十分に理解できていない点を度々指摘していただき、大変励みになりました。また、長年にわたり、学生が南極観測・北極観測へ参加できるよう尽力くださったことで、南極・北極における様々な経験を得ることができました。先生から見ると、よくわからないことを数多く行なっている学生だったかと思いますが、暖かく受け入れてくださいり、本当にありがとうございました。

また、北海道教育大学の尾関先生には本観測を行うにあたり、様々な技術的指導をいただきました。最初は何をしたらいいかわからず大変ご迷惑をおかけしたかと思いますが、親身に色々とお教えください誠にありがとうございました。

副指導教官であった早稲田先生には専門外であろうこの研究に対しても前向きなアドバイスを多数いただきました。大変助かりました。

研究室の皆さんにもこの場でお礼を述べさせてください。研究室の先輩であった高橋さん、矢口さんにはJARE59で頼りない自分を色々な面で支えてもらいました。お二人がいなかつたら途中でめげていたかもしれません。Warunaさん、Mariapinaさんは私の拙い英語にも関わらず、真剣に様々な相談に乗っていただきました。初さん、洪さん、松井さん、草川さん、小野村さんは研究で成果が出ず、辛かった時にも気楽に話してくれました。大変心が穏やかになりました。同期の吉野さんとは、修士論文に向けた研究で、うまくいかない時も一緒に励ましあって頑張りました。この修士論文を折れずに書き上げることができたのは吉野さんのおかげです。また卒論と一緒に作成した山田さんからは様々な技術を勝手に見て学ばせていただきました。世の中技術力のある人はたくさんいるんだなとしみじみと感じました。大気海洋研究所の木村さんからは衛星関連の面白い話を伺いました。ありがとうございました。また、噂のもつ太郎に連れて行ってもらえると嬉しいです。

JARE59においては北海道大学平野先生、伊藤さん、MWJ野口さん、NME木村さん、海上保安庁渡辺さんなど多くの方にお世話になりました。何もわからなかった私に対し、海洋観測・海水観測など多くのことを教えていただきました。ありがとうございました。自衛隊員の皆様には船のことが十分に分かっていないにも関わらず、観測機器の設置など丁寧に教えていただきました。

た。本当にありがとうございました。

JAMSTEC 赤根さん、河野さんには「みらい」の RAO の取得にご協力いただきました。お二人がいなければ、今回の解析はできませんでした。ありがとうございました。

北極航海 2018においては、NIPR 猪上先生、北見工業大学佐藤先生、JAMSTEC 竹谷先生や NME・MWJ 観測技術員の皆様などに大変お世わになりました。南極と違い完全に一人での観測だったので不安だったのですが、暖かく見守ってくださりありがとうございました。

ここには紙面の都合上乗せれなかった多くの大学の友人にもこの場で御礼申し上げます。

そして最後に、家族の皆さん、色々と奇想天外な行動を繰り返してきた私に対して文句も言わず、ずっとこれまで支え続けてくれて本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Arctic Marine Operations Challenges Recommendations Volume 5 Marine Icing on Arctic Offshore Operations - Pilot Project. Technical report, 2013.
- [2] ArCS. 北極域研究推進プロジェクト 北極域での挑戦パンフレット. <https://www.arcs-pro.jp/about/pamphlet/pamphlet201712.pdf>, 2017. Accessed:2019/05/14.
- [3] A. R. Dehghani-Sanij, Y. S. Muzychka, and G. F. Naterer. Analysis of ice accretion on vertical surfaces of marine vessels and structures in arctic conditions. 2015.
- [4] ECMWF. Parameter Database. <https://apps.ecmwf.int/codes/grib/param-db>. Accessed:2019/6/14.
- [5] International Polar Year (IPY) educational posters. Northern sea route and the north-west passage compared with currently used shipping routes. <http://www.grida.no/resources/7150>, 2007. Accessed:2019/06/16.
- [6] 松本 健寛 al. トライトンブイ搭載次世代型雨量計測システムの開発. 海の研究, Vol. 17, No. 4, pp. 241–253, 2008.
- [7] Nobuhiro Isezaki. A new shipboard three - component magnetometer. *GEOPHYSICS*, Vol. 51, No. 10, pp. 1992–1998, Oct 1986.
- [8] Inoue Jun. [MR18-05C] R/V Mirai Cruise Report MR18-05C. Technical report, 2019.
- [9] J. E. Overland, C. H. Pease, R. W. Preisendorfer, and A. L. Comiskey. Prediction of vessel icing. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 25, No. 12, pp. 1793–1806, 1986. doi: 10.1175/1520-0450(1986)0252.0.CO;2; 12.
- [10] James E. Overland. Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures. *Weather and Forecasting*, Vol. 5, No. 1, pp. 62–77, Mar 1990.
- [11] Toshihiro Ozeki, Toshinari Shiga, Junji Sawamura, Yuhei Yashiro, Satoru Adachi, and Hajime Yamaguchi. Development of sea spray meters and an analysis of sea spray characteristics in large vessels, 2016. J2: ISOPE-I-16-509.
- [12] Toshinari Shiga, Toshihiko Ozeki, Junji Sawamura, and Hajime Yamaguchi. Analysis of sea spray characteristics in large vessels - Case study of the icebreaker Shirase. *Proc. 23th Intnatl. Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Japan*, pp. 25–28, 2015.

- [13] Julienne Stroeve, Marika M. Holland, Walt Meier, Ted Scambos, and Mark Serreze. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 9, p. n/a, May 1, 2007.
- [14] T and D. RTR-500 シリーズ ワイヤレスデータロガー. [https://www.tandd.co.jp/product/rtr500\\_series.html](https://www.tandd.co.jp/product/rtr500_series.html). Accessed:2019/7/3.
- [15] Ozeki Toshihiro, Yashiro Yuhei, and Adachi Satou. Spc 型しぶき計と船舶用雨量計しぶき計による飛沫量の比較計測. 第 31 回寒地技術シンポジウム, pp. 134–139, 2015.
- [16] W. P. Zakrzewski. Splashing a ship with collision-generated spray. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 65–83, 1987. ID: 271725.
- [17] クリマテック株式会社. 吹雪計 (飛雪粒子計測) Snow Particle Counter. [http://www.weather.co.jp/catalog\\_html/CNE-SPC-S7.htm](http://www.weather.co.jp/catalog_html/CNE-SPC-S7.htm). Accessed:2019/5/14.
- [18] クリマテック株式会社. 船舶用雨量計. <http://weather.jp/product/1087.html>. Accessed:2019/7/3.
- [19] 山口一, 大塚夏彦. 北極海航路実現に向けた総合的研究と課題, 2017.
- [20] 中野佑哉. 北極海航路における最適航路探索に関する研究, Sep 25, 2015.
- [21] 岡田健吾. 最適航路探索を用いた北極海航路の航行容易性評価. PhD thesis, 2019.
- [22] 今井克哉. 航行シミュレーションによる北極海航路の可能性評価, Mar 23, 2017.
- [23] 内閣府. 我が国の北極政策. [https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/arcticpolicy/pdf/japans\\_ap.pdf](https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/arcticpolicy/pdf/japans_ap.pdf), 2015. Accessed:2019/1/23.
- [24] 高橋利夫. Powell のハイブリッド法による非線形最小二乗法プログラム. 東北工業技術研究所報告, No. 34, pp. 1–10, 2001. doi: pmid:.
- [25] 杉村剛, 矢吹裕伯. 北極域データアーカイブシステム (ads). [https://nipr.repo.nii.ac.jp/?action=repository\\_bibtex&itemId=15145&itemNo=1](https://nipr.repo.nii.ac.jp/?action=repository_bibtex&itemId=15145&itemNo=1), Oct 2018.
- [26] 北極海航路ハンドブック検討委員会, 公益社団法人日本海難防止協会. 北極海航路ハンドブック. 2015.
- [27] 翼友正. 連続体の力学. 岩波基礎物理シリーズ 2. 岩波書店, 第 11 版, 2009.
- [28] 国土交通省. 海洋開発工学概論 海洋開発技術編, 2018.
- [29] 国立研究開発法人海洋研究開発機構. JAMSTEC 文書カタログ. [http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc\\_catalog/j/index.html](http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc_catalog/j/index.html). Accessed:2019/6/14.

- [30] 国立研究開発法人海洋研究開発機構. データ・サンプル探索システム : DARWIN. <http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/j>. Accessed:2019/6/14.
- [31] 国立研究開発法人海洋研究開発機構. 海洋地球研究船「みらい」利用の手引き. [https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/boarding/guide\\_ship/doc/mirai.pdf](https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/boarding/guide_ship/doc/mirai.pdf). Accessed:2019/6/14.
- [32] 国立研究開発法人海洋研究開発機構 HP. 海洋地球研究船「みらい」. <https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/mirai.html>. Accessed:2019/6/14.
- [33] 外務省. 北極サークル・開会セッション河野外務大臣による基調講演. <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000410408.pdf>, 2019. Accessed:2019/1/23.
- [34] 寺田ポンプ製作所. 特定用途ポンプ. <https://www.teradapump.co.jp/wp/wp-content/themes/teradapump/pdf/product/P120.pdf>. Accessed:2019/7/1.
- [35] 尾関俊浩. 船体着氷を知る 船体着氷はどのように発生する？その対策は？ [http://www.nipr.ac.jp/grene/20151106seminar/PDF/07\\_Ozeki.pdf](http://www.nipr.ac.jp/grene/20151106seminar/PDF/07_Ozeki.pdf). GRENE 北極気候変動研究事業 第 2 回特別セミナー.
- [36] 国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪水防災研究センター新庄雪氷環境実験所. 雪氷防災実験棟. [http://www.bosai.go.jp/seppyo/jikkentou/ces\\_youran.pdf](http://www.bosai.go.jp/seppyo/jikkentou/ces_youran.pdf). Accessed:2019/6/16.
- [37] 新潟電気株式会社. SPC-S7 水しぶき仕様 取説.
- [38] 新潟電気株式会社. 飛雪粒子計数装置一水しぶき仕様 (SNOW PARTICLE COUNTER—WATER SPLASH ver.) S P C—S 7 (水飛沫仕様) 仕様書.
- [39] 戸田真. 船舶における海水飛沫発生・飛来に関する研究：船体着氷の予測方法確立を目指して, Mar 23, 2017.
- [40] 第一管区海上保安本部交通部. 海上安全だより No.66. <http://www.kaiho.mlit.go.jp/01kanku/anzen/anzen66.pdf>. Accessed:2019/6/16.
- [41] 元良誠三. 船体運動力学 (電子改正版). (株) 日本船舶海洋工学会, 2007.
- [42] 霧のいけうち. 空円錐ノズル / 小噴量形 KD. <https://www.kirinoikeuchi.co.jp/download/catalog/pdf/205.pdf>. Accessed:2019/7/1.
- [43] 霧のいけうち. 空円錐ノズル / 微霧発生極小噴量形 KB. <https://www.kirinoikeuchi.co.jp/download/catalog/pdf/201.pdf>. Accessed:2019/7/1.